

научно-технический

журнал ISSN 2220-4245

ИЗВЕСТИЯ

№ 3(43)

2020

Транссиб

Юбилейный выпуск, посвященный 120-летию
Омского государственного университета путей сообщения



120 лет

ОмГУПС

10 лет



К 120-летию Омского государственного университета путей сообщения



Уважаемые читатели!

В 2020 году исполняется 120 лет со дня основания Омского государственного университета путей сообщения – одного из ведущих вузов России, находящегося в ведении Федерального агентства железнодорожного транспорта.

В настоящее время ОмГУПС представляет собой университетский комплекс, который осуществляет подготовку по программам высшего и среднего профессионального образования.

Наш университет – один из ведущих разработчиков на железнодорожном транспорте в области диагностики технических средств; технологии восстановления и ремонта подвижного состава; тяги поездов; электроснабжения и токосъема, ресурсо- и энергосберегающих технологий и оборудования.

Омский государственный университет путей сообщения является динамично развивающимся учебно-научно-производственным центром, имеющим высокий научно-технический потенциал, способным эффективно выполнять все функции, связанные с организацией и проведением образовательного процесса и подготовкой научно-педагогических кадров высшей квалификации, а также оказывать существенное влияние на научно-техническую политику региона и отрасли.

В год своего 120-летия ОмГУПС уверенно смотрит в будущее, опираясь на свои исторические традиции, стремится наращивать свой вклад в дело подготовки высококвалифицированных кадров для железных дорог России.

Приглашаем ученых и специалистов всех видов транспорта к сотрудничеству. Мы готовы принять Ваши предложения по публикации материалов по проблемам и перспективам развития железнодорожного транспорта.

С уважением,



С. М. Овчаренко, ректор ОмГУПС, главный редактор журнала «Известия Транссиба»



И. И. Галиев, президент ОмГУПС, заместитель главного редактора журнала «Известия Транссиба»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент.
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент.
4. Черемисин Василий Титович – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПС, д.т.н., профессор.
5. Ведрученко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
6. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
7. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
8. Зыкина Анна Владимировна – зав. кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
9. Исakov Александр Леонидович – зав. кафедрой «Исследования, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
10. Каргаполов Сергей Константинович – ректор ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
11. Косарев Александр Борисович – первый зам. генерального директора АО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
12. Лю Цзянькунь – доктор, профессор, зам. декана Школы гражданского строительства Университета Сунь Ятсена (Чжухай, Китай).
13. Лебедев Виталий Матвеевич – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
14. Парамонов Александр Михайлович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУ, д.т.н., доцент (Омск).
15. Сидоров Олег Алексеевич – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
16. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Подвижной состав» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
17. Файзибаев Шерзод Сабирович – зав. кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» ТГТУ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
18. Харламов Виктор Васильевич – зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор.

EDITORIAL BOARD

1. Ovcharenko Sergey Mikhailovich – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. Galiev Ilkham Islamovich – deputy chief editor, the president of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. Shantarenko Sergey Georgievich – deputy chief editor, vice-rector for research of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. Cheremisin Vasily Titovich – deputy chief editor, director of SRIE OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
5. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
6. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Poland).
7. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
8. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. Isakov Alexander Leonidovich – head of the department «Railway and Highway Surveying and Design Engineering» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
10. Kargapolov Sergey Konstantinovich – rector of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
11. Kosarev Alexander Borisovich – senior deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
12. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Sun Yat-sen University, the associate dean of the School of Civil Engineering (Zhuhai, China).
13. Lebedev Vitaliy Matveyevich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
14. Paramonov Alexander Mikhailovich – professor of the department «Heat-power» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk).
15. Sidorov Oleg Alexeevich – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
16. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Rolling stock» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
17. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – head of the department «Wagons and wagon facilities» of ISTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
18. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Иванченко Владимир Иванович – ответственный секретарь, к.т.н. (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Кабалык Ю. С. Повышение коэффициента мощности электровозов посредством модернизации плечей выпрямительно-инверторных преобразователей.....2
- Кривошея Ю. В. Влияние деформаций микрогеометрии поверхности на величину контактного термического сопротивления дискового тормоза.....11
- Лакин И. И. Многофакторный анализ статистической информации с использованием методов теории нечетких множеств.....20
- Скоков Р. Б., Никифоров М. М., Кондратьев Ю. В. Нормативные основы стандарта по выбору схем и основных параметров сглаживающих устройств железнодорожных тяговых подстанций постоянного тока.....27
- Вильгельм А. С. Применение интеллектуальных систем и технологий для мониторинга и планирования энергоэффективности тяги поездов.....39
- Андреевский А. Г., Москвичев В. В., Чабан Е. А. Расчетно-экспериментальное определение динамических характеристик кожуха тяговой зубчатой передачи электровоза...47
- Семенов А. П. Разработка модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования.....58
- Перестенко А. Е. Контроль эксплуатационных показателей электроподвижного состава и устройств электроснабжения с применением технологий обработки больших данных.....66

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Коссов В. С., Луний А. А., Чунин С. В. Расчетное исследование собственных частот и форм колебаний рельса.....76

Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

- Мамаев Э. А., Сорокин Д. В. К оценке потенциала развития международного транспортного коридора «Север - Юг».....86
- Годованый К. А., Колесников М. В. Технологический аутсорсинг как инструмент развития рынка операторских компаний.....97
- Король Р. Г., Нечипорук М. В. Логистические решения по регулированию порожнего вагонного потока на Восточном полигоне железных дорог.....107
- Шеховцов А. И. Алгоритм нахождения вагонов на путях необщего пользования как основа для повышения качества функционирования системы «железная дорога - клиенты».....119

Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

- Кадцын И. И., Стариков А. П., Ведрученко В. Р. Исследование теплофизических характеристик грунтов города Омска для проектирования геотермальных зондов.....128

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Брылова Т. Б., Кутышкин А. В. Использование имитационного моделирования при реинжиниринге технологических процессов ремонта подвижного состава.....139
- Харлап С. Н. Применение диверситета в автоматизированных системах управления опасными технологическими процессами для повышения устойчивости к систематическим отказам.....148

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОмИИТ))»

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

Ю. С. Кабалык

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
г. Хабаровск, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПОСРЕДСТВОМ МОДЕРНИЗАЦИИ ПЛЕЧЕЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Аннотация. Предметом исследования является силовой тиристорный преобразователь электровозов переменного тока и его влияние на коэффициент мощности локомотива. Предложен и проанализирован новый способ повышения коэффициента мощности электровозов переменного тока с тиристорными преобразователями электроэнергии. К таким электровозам относятся локомотивы серий 2ЭС5К, ВЛ85, ЭП1 и др. В начале статьи кратко рассмотрены существующие способы повышения коэффициента мощности и указан их недостаток по сравнению с предложенным способом. Также проанализирован недостаток существующих преобразователей, заключающийся в наличии задержки открытия тириستоров в начале полупериода питающего напряжения. В предлагаемом способе подразумевается модернизация цепей управления тиристорами преобразователя, благодаря которой в начале полупериода за счет питающего напряжения на управляющем электроде самопроизвольно создается ток управления. Благодаря этому тиристоры открываются с минимальной задержкой относительно начала полупериода. Для оценки эффективности предложенной модернизации было проведено компьютерное моделирование работы силовой схемы электровоза в программе ORCAD. Моделирование проводилось для двух вариантов: силовая схема со штатными преобразователями и силовая схема с преобразователями, модернизированными в соответствии с предлагаемым способом. При моделировании исследовалось изменение значения коэффициента мощности электровоза при различных токе тяговых двигателей, зоне и угле регулирования. При исследовании осциллограмм токов различных плеч преобразователя обнаружено, что при использовании модернизированных преобразователей момент окончания сетевой коммутации наступает раньше, чем в штатной схеме. Отсутствует также участок с отрицательным напряжением на выходе преобразователя в начале полупериода. В конце статьи приведены значения коэффициента мощности электровоза при различных условиях. Эти результаты показывают, что использование предлагаемого способа повышает коэффициент мощности электровоза в среднем на 1,2 процентных пункта.

Ключевые слова: электровоз, выпрямительно-инверторный преобразователь, коэффициент мощности, энергоэффективность, управление тиристорами.

Iurii S. Kabalyk

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

INCREASING THE POWER FACTOR OF ELECTRIC LOCOMOTIVES BY UPGRADING THE RECTIFIER-INVERTER CONVERTERS ARMS

Abstract. The subject of the research is the power thyristor converter of AC electric locomotives and its influence on the power factor of the locomotive. A new method for increasing the power factor of AC electric locomotives with thyristors power converters is proposed and analyzed. These electric locomotives include locomotives of the 2ES5K, VL85, EP1 series, etc. At the initial of the paper, the existing methods of increasing the power factor are briefly considered and their disadvantage in comparison with the proposed method is indicated. The drawback of existing converters is also analyzed, which consists in the presence of a thyristor opening delay at the beginning of the supply voltage half-cycle. The proposed method implies the modernization of the control circuits of the thyristors of the converter, due to which, at the beginning of the half-period, a control current is spontaneously created on the control electrode by means of the supply voltage. As a result, the thyristors open with a minimum delay after the start of the half-cycle. To verification the effectiveness of the proposed solutions, a computer simulation of the operation of the power circuit of an electric locomotive in the ORCAD program was carried out. Simulation was carried out for two options: a power circuit with standard converters and a power circuit with converters upgraded in accordance with the proposed method. During the simulation, the change in the value of the power factor of an electric locomotive was investigated at different currents of traction motors, zone and angle of regulation. Analysis of the oscillograms of converter various arms currents the revealed that when using the modernized converters, the moment of the end of the network switching occurs earlier than in the standard circuit. There is also no area with negative voltage at the output of the converter at the beginning of the half-cycle. At the end of the paper, the values of the electric locomotive power factor are given under various conditions. These results show that the use of the proposed method increases the power factor of an electric locomotive by an average of 1.2 percentage points.

Keywords: electric locomotive, rectifier-inverter converter, power factor, energy efficiency, control of a thyristor.

Большинство российских электровозов переменного тока имеют тяговые двигатели постоянного тока. Для питания таких двигателей, как правило, применяются выпрямительно-инверторные преобразователи (далее – ВИПы), выполненные на тиристорах. Эти преобразователи осуществляют плавное регулирование выпрямленного напряжения на двигателях в режиме тяги, а также инвертируют ток тяговых двигателей в контактную сеть при рекуперативном торможении. Основным конструктивным элементом ВИПа является силовой блок, который представляет собой восьмиплечевую мостовую схему (рисунок 1, а). Полумосты имеют центральные выводы (точки 1, 2, 3, 4 на рисунке 1, а), которые подключаются к секциям вторичной обмотки тягового трансформатора. На крайних выводах полумостов образуется выпрямленное напряжение, которое подается на тяговые двигатели [1].

В используемых на электровозах ВИПах каждое плечо представляет собой параллельное соединение цепей из двух тиристоров, соединенных последовательно и оборудованных выводами для управления. На рисунке 1, б представлена упрощенная схема управления тиристорами плеча ВИПа. Управление тиристорами осуществляется с помощью блоков импульсного вывода (БИВов), являющихся частью микропроцессорной системы управления и диагностики электрооборудования электровоза (МУСД). Управление плечом происходит следующим образом. МУСД на основе полярности питающего напряжения и заданного режима управления определяет плечи, которые требуется открыть в текущем полупериоде питающего напряжения, и момент их открытия относительно начала полупериода. В определенный момент времени БИВ генерирует ток управления плечом $i_{упр. пл}$, который поступает на импульсные трансформаторы (ИТы). С выхода ИТа ток $i_{упр}$ поступает на управляющие электроды тиристора. Под действием этого тока ($i_{упр}$) и прямого напряжения между анодом и катодом тиристоры открываются и начинают проводить электрический ток.

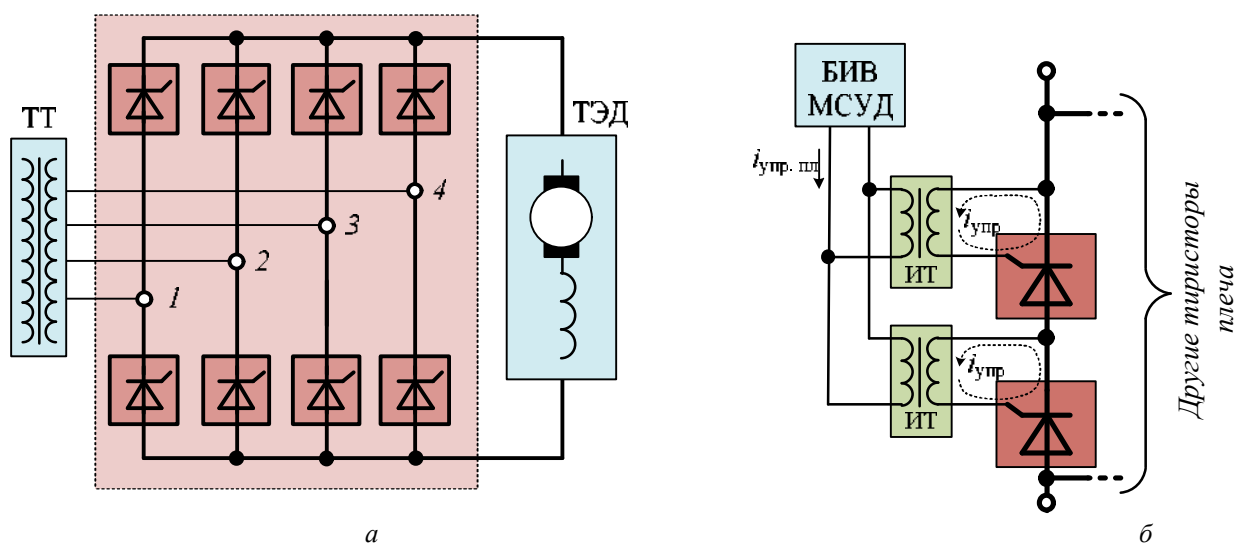


Рисунок 1 – Схема силового блока ВИПа (а) и упрощенная схема управления тиристорами каждого плеча ВИПа (б): ТТ – тяговый трансформатор; ТЭД – тяговые электродвигатели; БИВ МУСД – блок импульсного вывода МУСД; ИТ – импульсный трансформатор

Если при подаче импульса управления напряжение между анодом и катодом тиристора будет недостаточным, то он не откроется даже при наличии достаточного тока управления $i_{упр}$. Поэтому для гарантированного открытия тиристора необходимо, чтобы величина напряжения между его силовыми выводами была на достаточном уровне. Форма кривой питающего напряжения электровоза имеет значительные искажения, среди которых можно наблюдать провалы напряжения, высокочастотные пульсации и снижение напряжения в начале полупериода [2]. Последнее обусловлено в основном сетевой коммутацией в преобразователях электровозов, расположенных в этой же фидерной зоне. В результате такого про-

вала напряжение на входе ВИПа в начале полупериода будет сниженным, что может привести к невозможности открытия тиристорov. Для стабильного открытия тиристора в начале полупериода (сетевая коммутация) подачу угла открытия на него осуществляют с задержкой в 0,5 мс (9 ± 2 электрических градусов) относительно начала полупериода [3]. Такая задержка в большинстве случаев гарантирует достаточный уровень напряжения на тиристоре при различных искажениях формы кривой питающего напряжения. Присутствие этой задержки увеличивает угол фазового сдвига между первыми гармониками тока и напряжения на входе (первичной обмотке трансформатора) электровоза. Уменьшение угла открытия при сетевой коммутации менее 0,5 мс снизит вероятность открытия тиристорov, что может привести к сбоям работы электрооборудования.

Наличие фазового сдвига потребляемого тока значительно снижает коэффициент мощности электровоза. При эксплуатации значение этого коэффициента составляет от 0,60 до 0,85 в зависимости от зоны регулирования и выпрямленного напряжения [4]. Такие низкие значения коэффициента приводят к дополнительным потерям в тяговой сети.

Существует несколько путей повышения коэффициента мощности электровоза, среди которых можно выделить следующие:

1) применение пассивного компенсатора реактивной мощности. При таком способе в цепь вторичной обмотки тягового трансформатора подключаются LC -фильтры, которые снижают фазовый сдвиг тока в первичной обмотке. Применение такого способа позволяет увеличить коэффициент мощности электровоза до 97,2 % [4];

2) применение активного или гибридного компенсаторов реактивной мощности. При таком способе в цепь вторичной обмотки тягового трансформатора подключаются LC -фильтры совместно с полностью управляемым мостом на IGBT-транзисторах. Применение такого способа позволяет увеличить коэффициент мощности электровоза до 98 % [5, 6];

3) применение разрядного диодного плеча в цепи тяговых двигателей [7]. При таком способе к выходу ВИПа подключается диодное плечо, которое замыкает через себя ток двигателей от момента смены полярности питающего напряжения до момента окончания сетевой коммутации. Такой способ позволяет увеличить коэффициент мощности электровоза на 6 % [8].

Общим недостатком рассмотренных способов повышения коэффициента мощности является необходимость внесения значительных изменений в силовую цепь электровоза. Такой подход увеличивает цену и массогабаритные показатели электрооборудования, снижает его надежность и ремонтпригодность. В настоящей статье предлагается рассмотреть иной подход, который заключается в модернизации только преобразователя ВИПа без внесения изменений в силовую цепь электровоза.

В настоящей работе для увеличения коэффициента мощности электровоза предлагается модернизировать цепи управления тиристорами ВИПа таким образом, чтобы открытие тиристорov в начале полупериода происходило с минимально возможной задержкой. Предложение заключается в дооснащении цепи управляющего электрода каждого тиристора схемой с дополнительными элементами, благодаря которым в начале полупериода через управляющий электрод тиристора протекал бы ток управления. Таким образом, при нарастании прямого напряжения между анодом и катодом (U_{AK}) через управляющий электрод тиристора будет протекать ток управления ($i_{упр}$), в результате чего тиристор самопроизвольно откроется по достижении напряжением U_{AK} минимально требуемого уровня. Разработаны два варианта модернизации цепей управления ВИПа, реализующие предлагаемый принцип управления.

1) Система на делителе напряжения (рисунок 2, а) [9]. Резисторы $R1$ и $R2$ осуществляют деление напряжения, прикладываемого к тиристору; их номиналы подбираются таким образом, чтобы обеспечить требуемую величину тока управления $i_{упр}$ при достаточном напряжении между анодом и катодом U_{AK} . Диоды $VD1$ и $VD2$ препятствуют протеканию тока по делителю напряжения при отрицательном напряжении на тиристорном плече. Плавкий предохранитель $F1$ защищает цепь управления от перегрузки по току. Ключ K осуществляет под-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ключение рассмотренной цепи по команде от системы управления. В качестве ключа K можно использовать $IGBT$ -транзисторы (например, $IXLF19N250A$) или оптроны.

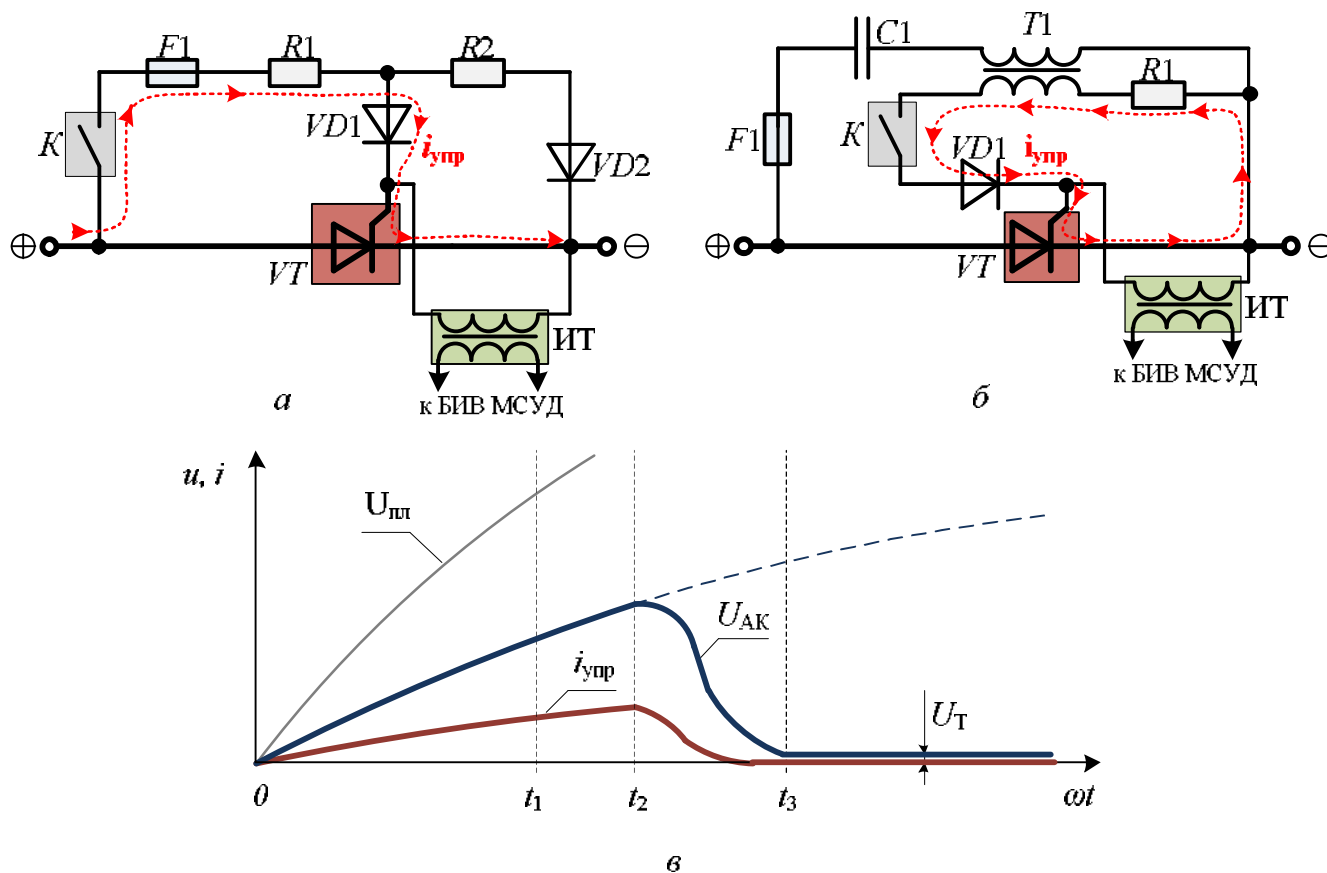


Рисунок 2 – Предлагаемые схемы управления тиристором (а, б) и процесс открытия тиристора (в)

2) Система на трансформаторе напряжения (рисунок 2, б) [10]. За счет влияния конденсатора $C1$ ток в первичной обмотке понижающего трансформатора $T1$ будет опережать по фазе напряжение, прикладываемое к тиристорам ($U_{ак}$). Индуктивность трансформатора $T1$ и емкость конденсатора $C1$ подбираются таким образом, чтобы ток в них опережал напряжение $U_{ак}$ на величину в 5...20 электрических градусов. Таким образом, во вторичной обмотке трансформатора $T1$ будет генерироваться ЭДС, по фазе опережающая напряжение $U_{ак}$ и создающая ток управления $i_{упр}$. Диод $VD1$ препятствует протеканию тока по вторичной обмотке трансформатора при отрицательном напряжении на тиристорном плече или при подаче импульса управления от БИВ МСУД. Плавкий предохранитель $F1$ и ключ K выполняют такие же функции, как в первом варианте модернизации. В качестве ключа K можно использовать низковольтный транзистор, поскольку трансформатор $T1$ понижает напряжение $U_{ак}$ до требуемого уровня.

Первый вариант модернизации работает следующим образом (рисунок 2, а). При замкнутом ключе K в начале полупериода питающего напряжения начинает возрастать напряжение на плече $U_{пл}$, которое пропорционально делится между тиристорами и создает на них напряжением между анодом и катодом $U_{ак}$. Это напряжение будет питать делитель напряжения на резисторах $R1$ и $R2$, откуда его часть (падение напряжения на резисторе $R2$) будет создавать напряжение между управляющим электродом и катодом – напряжение управления $U_{упр}$. Величина напряжения управления $U_{упр}$ будет зависеть от уровня напряжения $U_{ак}$ и номиналов резисторов $R1$ и $R2$. Дополнительно можно подключить стабилитрон параллельно резистору $R2$ или между управляющим электродом и катодом тиристора для ограничения напряжения управления $U_{упр}$ (на схеме не показан). При наличии напряжения $U_{упр}$ по управляющему

электроду тиристора будет протекать ток $i_{упр}$, пропорциональный напряжению U_{AK} . В некоторый момент времени (t_1 на рисунке 2, *в*) величина тока $i_{упр}$ достигнет значения, требуемого для открытия тиристора. По прошествии времени, равного задержке открытия (промежуток времени $t_1 - t_2$), тиристор начнет открываться и напряжение между его анодом и катодом U_{AK} станет снижаться (участок $t_2 - t_3$). После полного открытия тиристора (момент времени t_3) напряжение U_{AK} снизится до величины прямого падения напряжения U_T . Для тиристора ТЗ83-800 величина U_T составляет от 1,1 до 1,5 В при токе от 100 до 1000 А [11]. Такое низкое значение напряжения U_{AK} приводит к тому, что при полном открытии тиристора ток управления $i_{упр}$ снижается практически до нуля. Также из-за низкого значения U_T по цепи резисторов $R1$ и $R2$ будет протекать незначительный ток, который не будет приводить к существенному увеличению потерь энергии.

Процесс открытия тиристора при втором варианте модернизации будет во многом аналогичен первому варианту. Преимуществом второго варианта модернизации является относительно низкое значение напряжения, коммутируемого ключом K .

С учетом предлагаемых изменений алгоритм работы ВИПа будет изменен следующим образом. На первой зоне регулирования ключи K в предлагаемых схемах разомкнуты, а импульсы управления подаются в штатном режиме только через импульсные трансформаторы ИТ. В этом случае ВИП функционирует в обычном алгоритме и его схема не отличается от штатной. При переходе на вторую и последующие зоны регулирования появляется ряд плеч, которые должны открываться в начале полупериода (сетевая коммутация). В этих плечах в цепях управления необходимо замкнуть ключи K и не размыкать их вплоть до смены зоны регулирования. За счет этого при появлении положительного напряжения на плечах ВИПа их тиристоры будут самопроизвольно открываться с минимально возможной задержкой после начала полупериода. Таким образом, более раннее открытие плеч ВИПа будет приводить к более раннему началу смены полярности входного тока, что будет означать снижение фазового сдвига между током и напряжением в первичной обмотке тягового трансформатора и приведет к увеличению коэффициента мощности электровоза. При появлении отрицательного напряжения на плечах ВИПа дополнительные диоды в цепи управления будут препятствовать образованию тока управления и плечо будет оставаться закрытым.

Модернизация ВИПа предлагаемыми способами возможна в условиях депо при ремонте преобразователей со снятием с электровоза (в электроаппаратном цеху). При соответствующей проработке процесса ремонта трудозатраты можно свести к минимуму, что позволит снизить стоимость модернизации. Предлагаемые схемы модернизации состоят из недорогих электрических элементов, за исключением ключа K (см. рисунок 2, *а, б*), стоимость которого может достигать 4 тыс. руб. (IGBT-транзистор IXLFI9N250A). В итоге стоимость дополнительных элементов для одного ВИПа составляет около 100 тыс. руб. Указанные затраты будут покрываться экономией электроэнергии от повышения коэффициента мощности электровоза, а срок окупаемости, по различным оценкам, не превысит двух лет.

С целью определения эффективности разработанных технических решений было проведено моделирование работы одной секции электровоза переменного тока в компьютерной программе *OrCAD*. Моделирование проводилось с учетом рекомендаций [12]. При моделировании были исследованы третья и четвертые зоны регулирования ВИПа. В качестве модели электровоза была взята модель силовой схемы электровоза 2ЭС5К в двух вариантах исполнения:

- 1) со штатным ВИПом;

- 2) с модернизированным ВИПом, цепи управления тиристорами которого оборудованы предлагаемой схемой (исследовался первый вариант модернизации).

Для первичного анализа результатов моделирования рассмотрим осциллограммы электромагнитных процессов в плечах ВИПа. На рисунке 3 представлены диаграммы токов коммутируемых плеч и напряжения на выходе ВИПа для двух вариантов исполнения ВИПа на

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

четвертой зоне регулирования с током тяговых двигателей $I_d = 700$ А и углом регулирования $\alpha_p = 45$ эл. град.

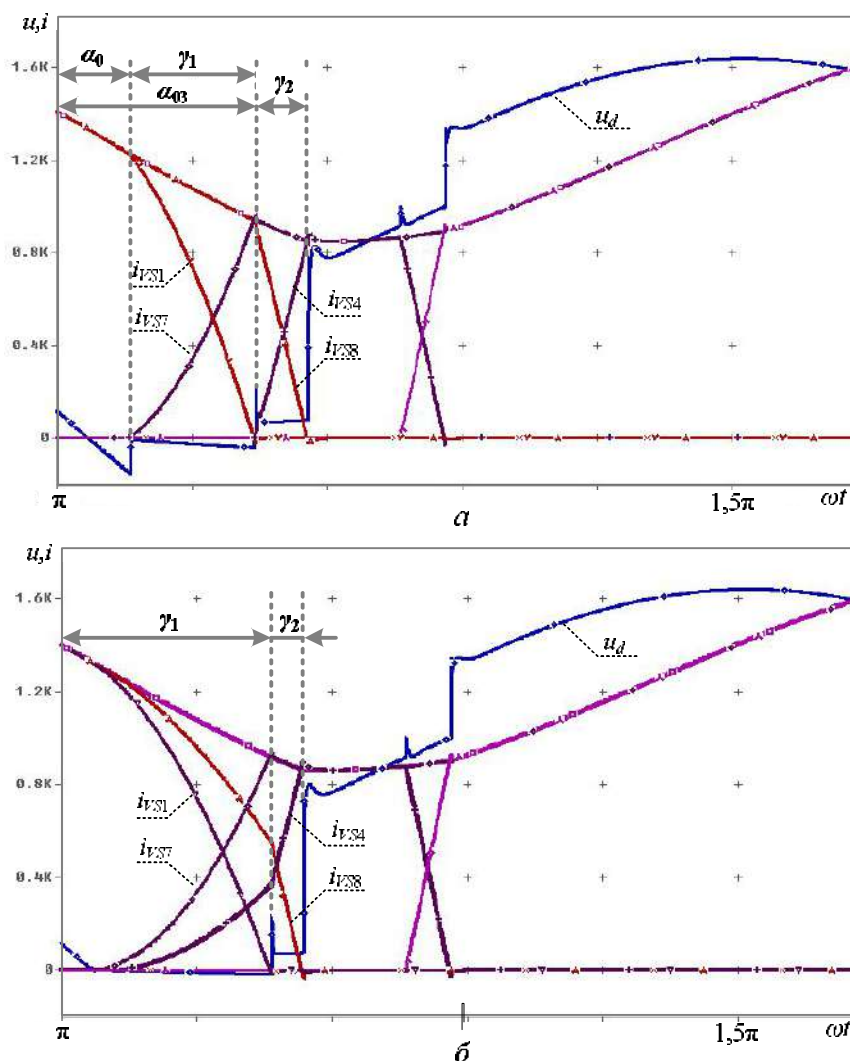


Рисунок 3 – Осциллограммы токов и напряжения ВИПа при сетевой коммутации: *a* – процессы в штатном ВИПе; *б* – процессы в модернизированном ВИПе; $i_{VS1} - i_{VS8}$ – токи соответствующих плеч ВИПа; u_d – выпрямленное напряжение на выходе ВИПа

Из представленных на рисунке 3 осциллограмм видны процессы изменения токов под действием изменяющегося питающего напряжения и открытия тиристорных плеч. Можно видеть, что при штатной работе после угла открытия α_0 ток в первом плече снижается, а в седьмом возрастает. После подачи угла регулирования α_{03} ток в восьмом плече начинает снижаться, а на его смену приходит четвертое плечо. Это подтверждает штатный алгоритм работы ВИПа. На рисунке 3, *б* четвертое и седьмое плечи открываются сразу после смены полярности напряжения на выходе ВИПа, что приводит к увеличению тока в них и снижению тока в первом и восьмом плечах. Из осциллограмм можно определить момент окончания сетевой коммутации, что будет говорить об окончании изменения полярности входного тока электровоза. При штатном ВИПе (рисунок 3, *a*) окончание сетевой коммутации заканчивается спустя 1,87 мс ($\alpha_{03} + \gamma_2$) относительно начала полупериода питающего напряжения, а при модернизированном ВИПе – спустя 1,78 мс. Подобное снижение времени окончания коммутации при модернизированном ВИПе наблюдается при всех рассмотренных зонах регулирования и различном токе двигателей. Дополнительно со снижением времени окончания

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

коммутации в случае применения предлагаемого ВИПа будет происходить более раннее начало изменения входного тока электровоза. Это связано с отсутствием задержки открытия тиристорov относительно начала полупериода. Таким образом, можно говорить, что использование предлагаемых технических решений приводит к раннему окончанию сетевой коммутации. Перечисленные выше изменения в переходных процессах приводят к повышению коэффициента мощности электровоза.

Для оценки уровня изменения коэффициента мощности были рассчитаны энергетические параметры электровоза. Расчет производился при фиксированных значениях регулируемых параметров схемы:

ток тяговых двигателей $I_d = 350$ или 700 А. Эти значения приняты как близкое к номинальному току и как половина такого значения;

зоны регулирования третья и четвертая. Эти номера зон выбраны как наиболее часто используемые при эксплуатации электровоза;

углы регулирования $\alpha_p = 45, 90$ и 135 эл. град. Эти углы приняты исходя из того, что при больших углах регулирования наблюдается наименьший коэффициент мощности, поэтому желательно увидеть изменение коэффициента мощности как при больших, так и при малых углах регулирования.

При работе предлагаемого ВИПа отсутствует участок с отрицательным значением на осциллограмме напряжения на двигателях. В результате при одинаковых зоне и угле регулирования напряжение на двигателе при штатном ВИПе будет ниже этого напряжения при модернизированном ВИПе, что приведет к разности тока тяговых двигателей. Для поддержания постоянного тока тяговых двигателей при двух вариантах ВИПа осуществлялась корректировка противо-ЭДС якоря тяговых двигателей (скорости движения) для достижения единства тока тяговых двигателей I_d .

Коэффициент мощности электровоза рассчитывался на основе активной P и полной S мощностей электровоза, которые, в свою очередь, определялись аналогично расчетам, проведенным в работе [13].

На рисунке 4 представлены гистограммы со значениями коэффициента мощности при разной компоновке силовой схемы электровоза.

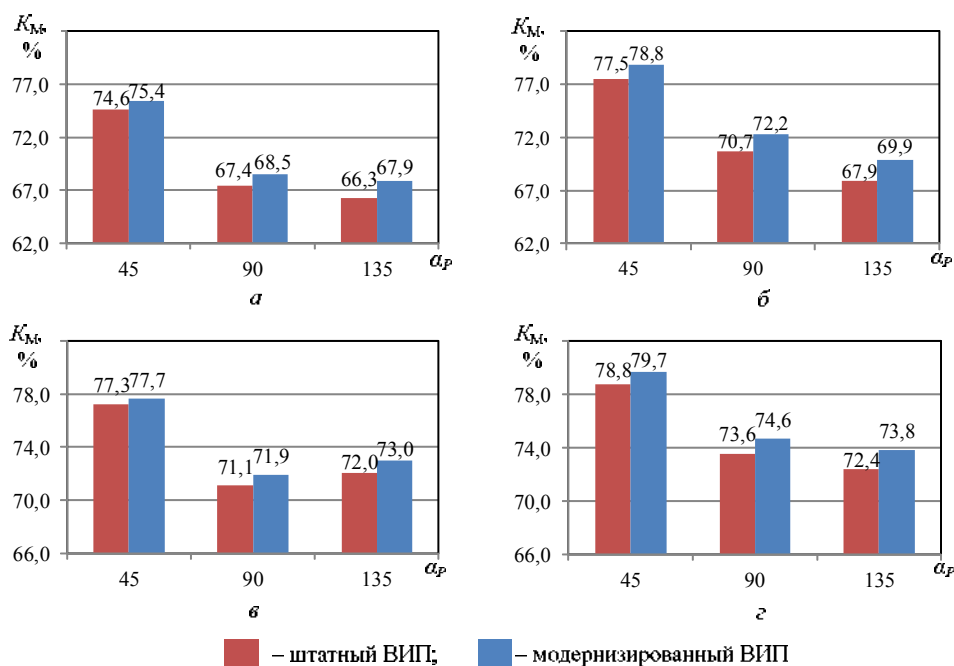


Рисунок 4 – Рассчитанное значение коэффициента мощности электровоза при различных параметрах регулирования: а – третья зона регулирования, $I_d = 350$ А; б – третья зона регулирования, $I_d = 700$ А; в – четвертая зона регулирования, $I_d = 350$ А; г – четвертая зона регулирования, $I_d = 700$ А

Из анализа гистограмм, представленных на рисунке 4, можно сделать вывод о том, что при всех проведенных расчетах значение коэффициента мощности электровоза со штатным ВИПом меньше коэффициента мощности электровоза с модернизированным (предлагаемым) ВИПом. Минимальное увеличение составило 0,4 процентных пункта при четвертой зоне регулирования, угле регулирования $\alpha_p = 45$ эл. град. и токе тяговых двигателей $I_d = 350$ А (рисунок 3, в). Максимальное увеличение составило 2 процентных пункта при третьей зоне регулирования, угле открытия $\alpha_p = 135$ эл. град. и токе тяговых двигателей $I_d = 700$ А (см. рисунок 3, б). В среднем коэффициент мощности повышается на 1,2 процентных пункта, что гарантированно будет приводить к снижению потерь мощности в тяговой сети и, как следствие, к снижению расхода электрической энергии на тягу поездов.

Выводы по статье:

1. Предлагаемая модернизация электровоза затрагивает только цепи управления тиристорами ВИПа и не исключает его штатную работу в различных (аварийных) режимах, поэтому силовая схема электровоза практически не изменяет свою надежность и ремонтпригодность. Вместе с тем ВИП электровоза работает в более эффективном режиме.
2. Модернизация ВИПа электровозов путем обеспечения самопроизвольного открытия тиристорov при сетевой коммутации повышает коэффициент мощности электровоза в среднем на 1,2 процентных пункта.

Список литературы

1. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) : Руководство по эксплуатации. Книга 5. Описание и работа. Электронное оборудование. Преобразователи. ИДМБ.661142.009.РЭ5. – Новочеркасск : ВЭЛНИИ, 2005. – 125 с. – Текст : непосредственный.
2. Кабалык, Ю. С. Исследование совместной работы электровозов, оборудованных компенсаторами искажения напряжения / Ю. С. Кабалык. – Текст : непосредственный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 2. – С. 271 – 274.
3. Кулинич, Ю. М. Электронная и преобразовательная техника : учебное пособие / Ю. М. Кулинич. – Хабаровск : Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения, 2008. – 175 с. – Текст : непосредственный.
4. Испытания системы компенсации реактивной мощности на электровозе 3ЭС5К / А. С. Копанев, П. А. Хрипков, В. М. Волков, П. С. Вольт. – Текст : непосредственный // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2010. – № 2. – С. 14 – 36.
5. Кулинич, Ю. М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения : монография / Ю. М. Кулинич. – Хабаровск : Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения, 2001. – 153 с. – Текст : непосредственный.
6. Кулинич, Ю. М. Экстремальная система управления компенсатором реактивной мощности электровоза / Ю. М. Кулинич, С. А. Шухарев. – Текст : непосредственный // Вестник института тяги и подвижного состава. – 2015. – № 11. – С. 7 – 10.
7. Тихменев, Б. Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты : учебник / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1980. – 471 с. – Текст : непосредственный.
8. Мельниченко, О. В. Повышение энергетических показателей электровозов / О. В. Мельниченко, Ю. В. Газизов. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 3 – С. 50 – 51.
9. Патент № 2668571 Российская Федерация, МПК H02M 7/12 (2006.01). Многозонный выпрямитель однофазного переменного тока : № 2017134622 : заявлено 03.10.2017 : опубликовано 02.10.2018 / Кабалык Ю. С.; заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – 13 с. : ил. – Текст : непосредственный.

10. Патент № 2716139 Российская Федерация, МПК H02M 7/162 (2006.01), H02M 1/08 (2006.01). Многозонный выпрямитель однофазного переменного тока : № 2019123916 : заявлено 23.07.2019 : опубликовано 06.03.2020 / Кабалык Ю. С., Дроголов Д. Ю.; заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – 15 с. : ил. – Текст : непосредственный.

11. Тиристор Т353-800. Официальный сайт ПАО «Электровыпрямитель». – Текст : электронный. – URL: http://elvpr.ru/ru/deal/Thyristor-T353-800_1855 (дата обращения 23.10.2020).

12. Власьевский, С. В. Математическое моделирование процессов коммутации в выпрямительно-инверторных преобразователях электровозов однофазно-постоянного тока : монография / С. В. Власьевский. – Хабаровск : Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения, 2001. – 138 с. – Текст : непосредственный.

13. Кабалык, Ю. С. Электрические потери в контактной сети железных дорог при эксплуатации электровозов переменного тока / Ю. С. Кабалык, С. А. Шухарев, Д. Ю. Дроголов. – Текст : непосредственный // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. – 2019. – № 9. – С. 5 – 57. – DOI: 10.30987/article_5d9317b307f835.52624411.

References

1. *Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K) : Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kniga 5. Opisaniye i rabota. Elektronnoye oborudovaniye. Preobrazovateli* (Main electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Manual. Book 5. Description and operation. Electronic equipment. Converters). Novocherkassk : VELNII Publ., 2005, 125 p.

2. Kabalyk I. S. Research of joint operation of electric locomotives equipped with voltage distortion compensators [Issledovaniye sovmestnoy raboty elektrovozov, oborudovannykh kompensatorami iskazheniya napryazheniya]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* (Scientific problems of transport in Siberia and the Far East). – 2013, no. 2, pp. 271 – 274.

3. Kulinich I. M. *Elektronnaya i preobrazovatel'naya tekhnika* (Electronic and conversion technology). Khabarovsk : Far Eastern State Transport University Publ., 2008, 175 p.

4. Kopanев A. S., Khripkov P. A., Volkov V. M., Vol't P. S. Tests of the reactive power compensation system on the 3es5k electric locomotive [Ispytaniya sistemy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti na elektrovoze 3es5k]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proyektno-konstrukorskogo instituta elektrovozostroyeniya – Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Building*, 2010, no. 2, pp. 14 – 36.

5. Kulinich I. M. *Adaptivnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya gibridnogo kompensatora reaktivnoy moshchnosti elektrovoza s pлавным regulirovaniyem napryazheniya* (Adaptive automatic control system for a hybrid electric locomotive reactive power compensator with smooth voltage regulation). Khabarovsk : Far Eastern State Transport University Publ., 2001. – 175 p.

6. Kulinich I. M., Shukharev S. A. Extreme control system for reactive power compensator of an electric locomotive [Ekstremal'naya sistema upravleniya kompensatorom reaktivnoy moshchnosti elektrovoza]. *Vestnik instituta tyagi i podvizhnogo sostava – Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock*, 2015, no. 11, pp. 7 – 10.

7. Tikhmenev B. N., Trakhtman L. M. *Podvizhnoy sostav elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog. Teoriya raboty elektrooborudovaniya. Elektricheskiye skhemy i apparaty* [The rolling stock of electrified railways. Theory of the work of electrical equipment. Electrical circuits and apparatus] Moscow: Transport Publ., 1980, 471 p.

8. Melnichenko O. V., Gazizov I. V. Increasing the energy performance of electric locomotives [Povysheniye energeticheskikh pokazateley elektrovozov]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway transport journal*, 2010, no. 3, pp. 50 – 51.

9. Kabalyk I. S., e.a. *Mnogozonnyy vypryamitel' odnofaznogo peremennogo toka* [Multi-zone single phase AC rectifier]. Patent RF, no. 2668571, 2018.

10. Kabalyk I. S., Drogolov D. I. e. a. *Mnogozonnyy vypryamitel' odnofaznogo peremennogo toka* [Multi-zone single phase AC rectifier]. Patent RF, no. 2716139, 2020.

11. Thyristor T353-800. Official site of PJSC «Electrovypryamitel». Available at: http://elvpr.ru/ru/deal/Thyristor-T353-800_1855 (accessed 29 October 2020).

12. Vlas'yevskiy, S. V. *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov kommutatsii v vypryamitel'no-invertornykh preobrazovatelyakh elektrovozov odnofazno-postoyannogo toka* [Mathematical modeling of switching processes in rectifier-inverter converters of single-phase-direct current electric locomotives]. Khabarovsk : Far Eastern State Transport University Publ., 2001, 138 p.

13. Kabalyk I. S., Shukharev S. A., Drogolov D. I. Electric loss in railway contact network at ac electric locomotive operation [Elektricheskiye poteri v kontaktnoy seti zheleznnykh dorog pri ekspluatatsii elektrovozov peremennogo toka]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Bryansk state technical university*, 2019, no. 9, pp. 5 – 57, DOI: 10.30987/article_5d9317b307f835.52624411.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кабалык Юрий Сергеевич

Дальневосточный государственный университет
путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021,
Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Транспорт железных дорог», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-70-76.

E-mail: kabalyk@festu.khv.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kabalyk Iurii Sergeyevich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Seryshev st., Khabarovsk, 680021, the Russian
Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the de-
partment «Transport of railways», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-70-76.

E-mail: kabalyk@festu.khv.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кабалык, Ю. С. Повышение коэффициента мощ-
ности электровозов посредством модернизации плечей
выпрямительно-инверторных преобразователей /
Ю. С. Кабалык. – Текст : непосредственный // Известия
Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 2 – 11.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kabalyk I. S. Increasing the power factor of electric
locomotives by upgrading the rectifier-inverter converters
arms. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020,
no. 3 (43), pp. 2 – 11 (In Russian).

УДК 629.4-592

Ю. В. Кривошея

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДонИЖТ), г. Донецк, Донецкая Народная Республика

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ НА ВЕЛИЧИНУ КОНТАКТНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДИСКОВОГО ТОРМОЗА

Аннотация. В статье приведены результаты исследования влияния функциональной связи между параметрами микрогеометрии поверхности тормозного диска и уровнем напряженно-деформированного состояния области контакта на коэффициент термического сопротивления в условиях торможения. Приведены результаты экспериментального исследования процесса изменения шаговых и высотных параметров микрогеометрии поверхности тормозного диска под влиянием нормальных и тангенциальных сил, реализуемых при трении. Установлено, что под влиянием нормальных и тангенциальных сил высотные параметры микрогеометрии имеют тенденцию к увеличению, а шаговые – к уменьшению. Показано, что при расчете контактного термического сопротивления необходимо учитывать функциональную связь между геометрическими параметрами микронеровностей поверхности тормозного диска и уровнем напряженно-деформированного состояния области контакта. Расчеты, выполненные без учета этой связи, приводят к завышенным величинам контактного термического сопротивления и, соответственно, к погрешности в определении величин тепловых потоков, проходящих через область контакта сопряженных поверхностей. Уточнены величины констант, которые зависят от конструктивных особенностей узла трения дискового тормоза и используются для определения характера изменения геометрических особенностей микронеровностей. Выполнена коррекция входных параметров микрогеометрии поверхности тормозного диска с учетом динамики изменения их гео-

метрии под влиянием силового нагружения. Показано, что учет динамики изменения микрогеометрии поверхности целесообразно осуществлять при аналитическом определении контактного термического сопротивления дискового тормоза. Полученные результаты рекомендуется применять при расчетах характеристик трения и оценки тепловых потоков, проходящих через область взаимного контакта тормозного диска и тормозных колодок дискового тормоза в условиях торможения.

Ключевые слова: дисковый тормоз, контактное термическое сопротивление, деформация микрогеометрии поверхности, параметры микрогеометрии.

Yuriy V. Krivosheya

Donetsk Institute of Railway Transport (DRTI), Donetsk, the Donetsk People's Republic

EFFECT OF SURFACE MICROGEOMETRY DEFORMATIONS ON THE VALUE OF THE CONTACT THERMAL RESISTANCE OF THE DISC BRAKE

Abstract. The article presents the results of a study of the effect of the functional relationship between the parameters of the microgeometry of the brake disc surface and the level of the stress-strain state of the contact area on the thermal resistance coefficient. The results of an experimental study of the process of changing the step and altitude parameters of the microgeometry of the surface of the brake disc under the influence of normal and tangential forces realized during friction are obtained. It was found that under the influence of normal and tangential forces, the height parameters of the microgeometry tend to increase, and the step parameters tend to decrease. It is shown that when calculating the contact thermal resistance, it is necessary to take into account the functional relationship between the geometric parameters of the microroughness of the brake disc surface and the level of the stress-strain state of the contact area. The calculations performed without taking into account this connection lead to overestimated values of the contact thermal resistance and, accordingly, to errors in determining the values of heat fluxes passing through the contact area of the mating surfaces. The values of the constants, which depend on the design features of the friction unit of the disc brake and are used to determine the nature of the change in the geometric features of microroughnesses, have been specified. The correction of the input parameters of the microgeometry of the surface of the brake disc is performed, taking into account the dynamics of changes in their geometry under the influence of force loading. It is shown that it is advisable to take into account the dynamics of changes in the surface microgeometry in the analytical determination of the contact thermal resistance of a disc brake. The results obtained are recommended to be used in calculating the friction characteristics and assessing the heat fluxes passing through the area of mutual contact of the brake disc and brake pads of the disc brake.

Keywords: disc brake, contact thermal resistance, surface microgeometry deformation, microgeometry parameters.

Одним из основных факторов, оказывающих влияние на фрикционные характеристики железнодорожного дискового тормоза, является тепловая энергия, генерируемая при торможении. Распределение тепловой энергии между сопряженными рабочими элементами дискового тормоза в значительной мере зависит от величины термического сопротивления контакта, обусловленного несовершенной (с физической точки зрения) природой механического сопряжения поверхностей.

Вопросу теоретического определения термического сопротивления контакта поверхностей разной природы посвящен ряд работ [1 – 6], которые учитывают макро- и микрогеометрические параметры поверхностей, находящихся во фрикционном взаимодействии. При этом в расчетные зависимости контактного взаимодействия в качестве исходных компонентов закладываются физико-механические свойства более мягкого тела (тормозная накладка) и параметры микрогеометрии поверхности более твердого тела (тормозной диск), которые согласно современным методикам измеряются при отсутствии напряжений в объеме исследуемого элемента трения [7, 8]. Такой подход вносит существенные погрешности в расчет, так как в условиях действия механических напряжений в поверхностном слое элемента трения параметры микрогеометрии поверхности существенно отличаются от исходных, снятых в состоянии отсутствия механических напряжений в объеме материала.

Известно, что процесс торможения дисковым тормозом сопровождается интенсивным деформированием микрогеометрии поверхности тормозного диска и тормозных накладок, при котором геометрические параметры микронеровностей в свободной от контакта области

поверхностей претерпевают существенные изменения [9, 10]. Уровень этих изменений находится в зависимости от напряженно-деформированного состояния области контакта.

В связи с этим при расчете контактного термического сопротивления необходимо корректировать входные параметры микрогеометрии, учитывая функциональную связь между геометрическими параметрами микронеровностей поверхности и уровнем напряженно-деформированного состояния области контакта, что будет способствовать повышению достоверности расчета.

Контактное термическое сопротивление R_c как физическая характеристика обусловлено механическим и тепловым состоянием сопряженных поверхностей в местах их фактического контакта, а также средой, заполняющей межконтактные зазоры [2]:

$$R_c = \frac{1}{a_c} = \frac{\Delta T}{q}, \quad (1)$$

где ΔT – перепад средних температур контактирующих поверхностей;

q – плотность теплового потока, передаваемого при контактном теплообмене;

a_c – контактная термическая проводимость.

Структуру контактного термического сопротивления принято представлять в виде эквивалентной схемы (рисунок 1) [2, 4].

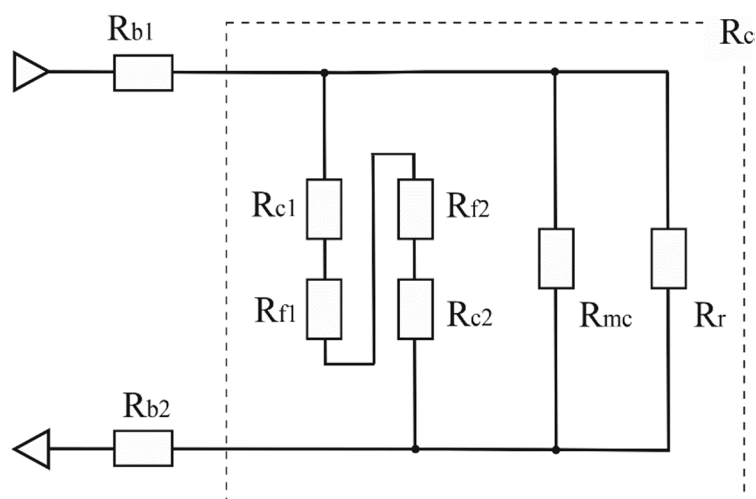


Рисунок 1 – Эквивалентная схема термического сопротивления контакта фрикционных элементов дискового тормоза: 1 – тело в паре трения; 2 – контртело в паре трения; R_{c1} , R_{c2} – термическое сопротивление, обусловленное «стягиванием» линий теплового потока к пятнам фактического контакта; R_{f1} , R_{f2} – термические сопротивления окисных пленок сопряженных поверхностей; R_{mc} – термическое сопротивление среды, заполняющей межконтактные зазоры; R_r – термическое сопротивление потока тепла, передаваемого с помощью излучения через межконтактные зазоры; $R_{b1,2}$ – термическое сопротивление материалов взаимодействующих поверхностей

Согласно схеме, представленной на рисунке 1, величину термического сопротивления контакта можно представить уравнением:

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_{c1} + R_{c2} + R_{f1} + R_{f2}} + \frac{1}{R_{mc}} + \frac{1}{R_r}. \quad (2)$$

Величины, входящие в уравнение (2), определены на основе выражения [2]:

$$\frac{1}{R_{c1} + R_{c2}} = 2,5 \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \left(\frac{P_n}{H} \right)^{0,95} \cdot \left(\frac{[M_1^2 + M_2^2]^{0,5}}{[\sigma_1^2 + \sigma_2^2]^{0,5}} \right), \quad (3)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности материалов взаимодействующих поверхностей;

P_n – номинальное давление в контакте сопряженных поверхностей;

M_1, M_2 – средний угол наклона образующей конуса микронеровностей сопряженных поверхностей;

σ_1, σ_2 – максимальная высота выступов микронеровностей в зоне контакта сопряженных поверхностей;

H – средняя микротвердость поверхности.

Средняя микротвердость поверхности определяется так:

$$H = \frac{P_n}{\left(\frac{P_n \cdot [M_1^2 + M_2^2]^{0,5}}{1,62 \cdot 10^6 \cdot c_1 \cdot \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \right)^{\frac{1}{1+0,071 \cdot c_2}}}, \quad (4)$$

где c_1, c_2 – коэффициенты микротвердости по Виккерсу для сопряженных поверхностей:

$$c_1 = 3,178 \cdot 10^9 \cdot (4 - 5,77 \cdot k + 4 \cdot k^2 - 0,61 \cdot k^3); \quad (5)$$

$$c_2 = -0,57 + k / 1,22 - k^2 / 2,42 + k^3 / 16,58, \quad (6)$$

где $k = 0,315 \cdot 10^{-9}$ Нб (безразмерная величина), Нб – микротвердость по Бринеллю, вычисляемая отдельно для каждой из сопряженных поверхностей.

Термическое сопротивление среды, заполняющей межконтактные зазоры:

$$\frac{1}{R_{mc}} = \frac{\lambda_m}{1,53 \cdot \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cdot \left(\frac{P_n}{H} \right)^{-0,097} + \frac{2 \cdot \gamma}{P_r \cdot (\gamma + 1)} \cdot \left(\frac{2 - \alpha_1}{\alpha_1} + \frac{2 - \alpha_2}{\alpha_2} \right) \cdot L_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T}{T_0}}, \quad (7)$$

где λ_m – теплопроводность среды в межконтактных зазорах;

$\alpha_{1,2}$ – коэффициенты аккомодации на границах сопряженных поверхностей с межконтактной средой;

L_0 – средний пробег молекулы среды в межконтактном зазоре с давлением P_0 и температурой T_0 ;

P_r – число Прандтля, определяется для среды в зазорах по средней температуре сопряженных поверхностей;

γ – степень тепла (статистический коэффициент).

Термическое сопротивление потоку тепла, передающегося посредством излучения, найдено из соотношения:

$$\frac{1}{R_r} = \frac{C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1) \cdot (T_1 - T_2)}, \quad (8)$$

где T_1, T_2 – средние температуры контактирующих поверхностей;

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степень черноты взаимодействующих поверхностей.

Для оценки напряженно-деформированного состояния фрикционных поверхностей железнодорожного тормоза рассмотрена схема нагружения дискового тормоза при торможении (рисунок 2). Тормозной диск 1 вращается в направлении угловой скорости ω . Тормозная накладка 2 прижимается к тормозному диску 1 под влиянием нормальной силы P . В результате на поверхности тормозного диска в области (+) действуют напряжения сжатия, а в области (–) – напряжения растяжения, что приводит к циклическим деформациям микрогеометрии поверхности. В области (+) происходит деформирование микрогеометрии поверхности, а в области (–) – ее упругое восстановление.

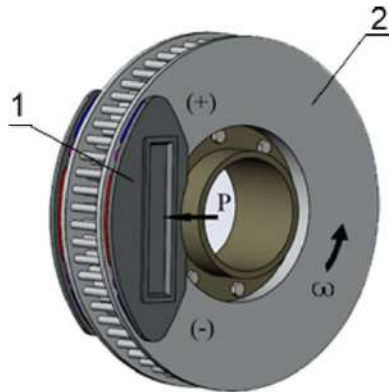


Рисунок 2 – Схема нагружения дискового тормоза при торможении

Восстановление деформированной микрогеометрии поверхности будет происходить при условии, что напряжения в поверхностном слое, вызванные действием нормальной силы прижатия P , будут меньше по сравнению с напряжениями сжатия поверхности тормозного диска в тангенциальном направлении. Особенности деформирования и восстановления микрогеометрии поверхности являются важным фактором, влияющим на характеристики дискового тормоза.

Оценку изменения параметров микрогеометрии фрикционных поверхностей в условиях их циклического деформирования можно произвести на основе известных зависимостей, которые откорректированы для случая контакта тормозной колодки с тормозным диском [11, 12]:

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{F_T}{2 \cdot \mu \cdot L} \cdot \frac{1}{\left(\frac{a_1}{e^{Sm_0/2\sigma_0}} + \frac{b_1}{2 \cdot Sm_0 / \sigma_0} + c_1 \right)}, \quad (9)$$

$$Sm = Sm_0 - \frac{F_T}{\mu \cdot L} \cdot \sqrt{\left(\frac{a_2}{e^{2Sm_0/\sigma_0}} + \frac{b_2}{2 \cdot Sm_0 / \sigma_0} + c_2 \right)}, \quad (10)$$

где σ_0, Sm_0 – соответственно высотные (максимальная высота микронеровностей) и шаговые (средний шаг микронеровностей) параметры микрогеометрии поверхности, находящейся во фрикционном взаимодействии, при условии отсутствия действия касательной силы F_m (для случая дискового тормоза – сила трения между тормозным диском и накладкой);

μ – модуль сдвига соответствующего фрикционного материала;

L – характерный линейный размер для площади фрикционного контакта;

$a_{1,2}, b_{1,2}, c_{1,2}$ – константы, значения которых зависят от конструктивных особенностей.

На основании уравнений (1), (2), (9), (10) дана оценка влияния деформирования микрогеометрии фрикционных поверхностей на величину контактного термического сопротивления области контакта рабочих элементов дискового тормоза.

Для проверки правомерности использования зависимостей (9), (10) для случая дискового тормоза, а также с целью установления особенностей деформирования микрогеометрии поверхности был проведен эксперимент на натурной стендовой установке [13]. Суть эксперимента заключалась в исследовании особенностей упругого деформирования микрогеометрии поверхности тормозного диска при приложении крутящего момента в зонах действия напряжений сжатия (+) и растяжения (–), а также в условиях отсутствия механических напряжений.

Для создания напряженно-деформированного состояния поверхности тормозного диска по периферии области контакта с тормозной накладкой с помощью системы нагружения стенда создавались нормальные усилия прижатия тормозных колодок к тормозному диску величиной 5,0 кН, а с помощью гидравлического домкрата, воздействующего на тормозной диск, создавались касательные усилия величиной до 1,5 кН.

В зонах (+) и (-) поверхности тормозного диска приклеивались специальные боксы, в которые помещалась быстро отвердевающая пластмасса. После отвердевания пластмассы полученный слепок воспроизводил поверхность тормозного диска в зеркальном отображении. Аналогично были получены слепки в условиях отсутствия механических напряжений в тормозном диске. С полученных слепков были сняты параметры шероховатости и волнистости на профилометре-профилографе (параметры шероховатости и волнистости были сняты с 20 трасс, расположенных вдоль направления вращения тормозного диска).

Результаты эксперимента и сравнение их с теоретическими значениями, полученными при помощи зависимостей (9) и (10), приведены на рисунке 3.

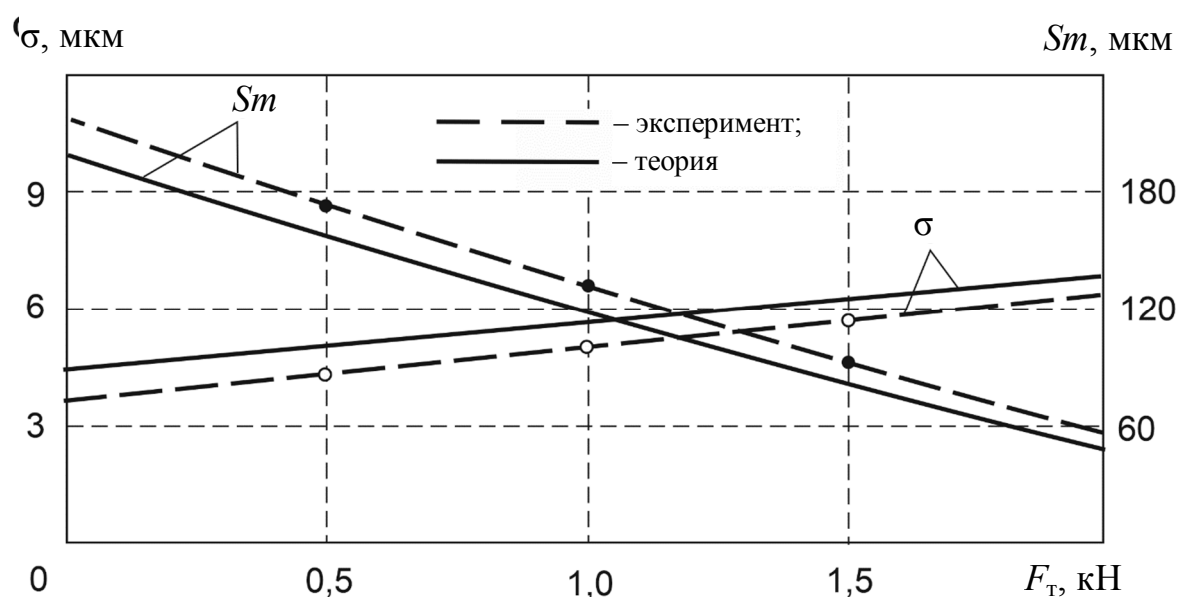


Рисунок 3 – Зависимость влияния тангенциального нагружения накладки дискового тормоза на высотные σ и шаговые Sm параметры микрогеометрии поверхности тормозного диска при его взаимодействии с тормозной накладкой

На рисунке 3 сплошными линиями показаны теоретические зависимости, а пунктирными линиями – соответственно экспериментальные, построенные по осредненным данным серии параллельных замеров (на графиках они показаны отдельными точками). Приведенные результаты свидетельствуют о приемлемом совпадении теоретических и экспериментальных результатов (в рассмотренном диапазоне нагрузок расхождение не превышает 20 %), что свидетельствует об адекватности расчетных зависимостей (9) и (10) для дискового тормоза. При расчете были уточнены величины констант, входящих в уравнения (9) и (10), которые зависят от конструктивных особенностей узла трения дискового тормоза, а именно: $a_1 = -7,641$; $b_1 = 0,041$; $c_1 = 5,316$; $a_2 = 0,0351$; $b_2 = 0,0081$; $c_2 = 0,197$.

Зависимости, характеризующие влияние деформирования микронеровностей на величину контактного термического сопротивления и тепловой поток, проходящий через сопряжение, представлены на рисунках 4, 5. Влияние высотного параметра σ микронеровностей поверхности тормозного диска при его взаимодействии с тормозной накладкой на величину контактного термического сопротивления данного сопряжения проиллюстрировано на рисунке 6. На указанных рисунках сплошные линии соответствуют зависимостям, построен-

ным без учета влияния деформирования микрогеометрии поверхности, а пунктирные линии – зависимостям, построенным с учетом влияния деформирования микрогеометрии поверхности.

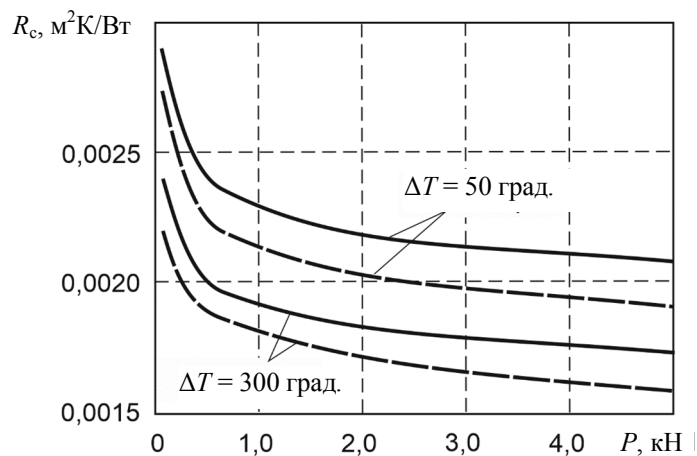


Рисунок 4 – Зависимость контактного термического сопротивления от силы прижатия накладки к тормозному диску при разнице температур взаимодействующих поверхностей ΔT

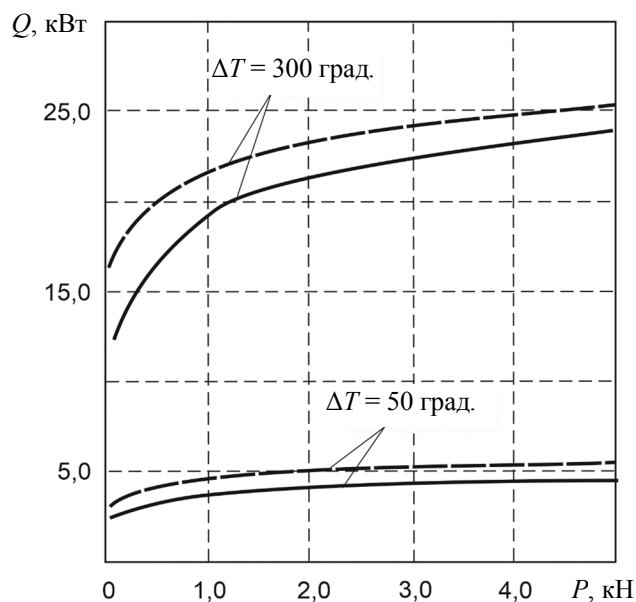


Рисунок 5 – Зависимость теплового потока, проходящего через зону контакта, от силы прижатия накладки к тормозному диску при разнице температур взаимодействующих поверхностей ΔT

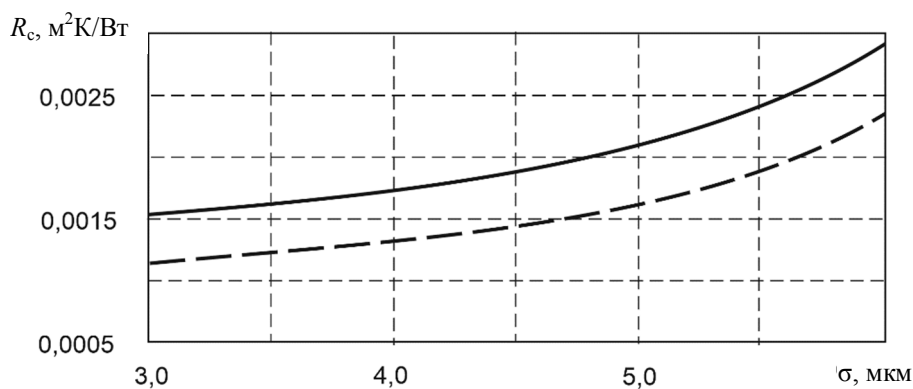


Рисунок 6 – Зависимость контактного термического сопротивления от высотного параметра микронеровности поверхности тормозного диска при его взаимодействии с тормозной накладкой

В качестве исходных данных при расчете использовались следующие значения параметров [13]: материал тормозного диска – сталь 35; материал тормозных накладок – серый чугун СЧ25; номинальная площадь контакта – $0,12 \text{ м}^2$; параметры микрогеометрии поверхности тормозного диска $\sigma_1 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, параметры микрогеометрии поверхности тормозной накладки: $\sigma_2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; средний угол наклона микронеровностей – $M \approx \text{tg}(M) \sim 0,05$.

Теплофизические и механические характеристики материалов, используемые в расчетах, рассматривались как функция температуры [6], значение которой определялось в процессе эксперимента ($P_0 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $T_0 = 293 \text{ К}$): $\lambda_1 = 35 \text{ Вт/(м·К)}$, $\lambda_2 = 54,5 \text{ Вт/(м·К)}$, $\lambda_m = 0,04 \text{ Вт/(м·К)}$; $P_r = 0,7$; $H_{b1} = 4,0 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $H_{b2} = 7,0 \cdot 10^9 \text{ Па}$; $\alpha_1 = 0,3$, $\alpha_2 = 0,7$; $\gamma = 1$; $\varepsilon_1 = 0,5$, $\varepsilon_2 = 0,6$; $L_0 \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}$.

Анализ полученных зависимостей позволил установить, что игнорирование в расчетах динамики деформирования микрогеометрии поверхностей приводит к завышенным расчетным величинам контактного термического сопротивления. Это, в свою очередь, обуславливает погрешность в нахождении распределения тепловых потоков, проходящих через область контакта сопряженных поверхностей тормозного диска и тормозной колодки.

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы.

1. При расчете контактного термического сопротивления необходимо учитывать функциональную связь между параметрами микрогеометрии поверхности и уровнем напряженно-деформированного состояния области контакта.

Показано, что расчеты, выполненные без учета этой связи, приводят к завышенным величинам контактного термического сопротивления и, соответственно, к погрешности в определении величин тепловых потоков, проходящих через область контакта сопряженных поверхностей. Установлено, что корректировка входных параметров микрогеометрии поверхности с учетом динамики изменения геометрии микронеровностей при нагружении является целесообразной при определении контактного термического сопротивления дискового тормоза.

2. Уточнены величины констант, которые зависят от конструктивных особенностей узла трения дискового тормоза, а именно: $a_1 = -7,641$; $b_1 = 0,041$; $c_1 = 5,316$; $a_2 = 0,0351$; $b_2 = 0,0081$; $c_2 = 0,197$ и которые используются для определения характера изменения геометрических особенностей микронеровностей.

Список литературы

1. Измайлов, В. В. Электротепловая аналогия и расчет проводимости дискретного контакта деталей машин / В. В. Измайлов, С. А. Чаплыгин. – Текст : электронный // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – Т. 8. – № 2. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/26TVN216.pdf>. – Режим доступа: свободный. – DOI: 10.15862/26TVN216.
2. Меснянкин, С. Ю. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел / С. Ю. Меснянкин, А. Г. Викулов, Д. Г. Викулов. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179. – № 9. – С. 945 – 970.
3. Измайлов, В. В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография / В. В. Измайлов, М. В. Новоселова. – Тверь : Тверской гос. технический ун-т, 2010. – 112 с. – Текст : непосредственный.
4. Biloborodova I., Sosnov I., Sergienko O. On contact thermal resistance in the system of active effective cooling of the locomotive disk brake, TEKA Commission of Motorization and Agriculture, Lublin, Polska Akademia nauk Oddzial w Lubline, 2010, vol. XB, pp. 362 – 370.
5. Yovanovich M. M., Marotta E. E. Thermal Spreading and Contact Resistance, Heat Transfer Handbook, chapt. 4, New York: Wiley, 2003, pp. 261 – 393.
6. Чиркин, В. С. Теплофизические свойства материалов / В. С. Чиркин. – Москва : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1979. – 356 с. – Текст : непосредственный.
7. Крагельский, И. В. Узлы трения машин : справочник / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. – Москва : Машиностроение, 1984. – 280 с. – Текст : непосредственный.

8. Справочник по триботехнике / под ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 1992. – Т. 3. – 400 с. – Текст : непосредственный.

9. Михин, Н. М. Влияние напряженного состояния области контакта твердых тел на параметры шероховатости и волнистости поверхностей / Н. М. Михин, Ю. И. Осенин. – Текст : непосредственный // Республиканский м/ведомст. научно-технический сборник «Проблемы трения и изнашивания». – Киев : Техника. – 1988. – № 34. – С. 46 – 54.

10. Осенин, Ю. И. Механизм возникновения шума при торможении подвижного состава дисковыми тормозами / Ю. И. Осенин, Ю. В. Кривошея, А. В. Чесноков. – Текст : непосредственный // Трение и износ. – 2020 (41). – № 2. – С. 241 – 247.

11. Осенин, Ю. И. Деформирование шероховатого слоя взаимодействующих поверхностей / Ю. И. Осенин, Е. В. Белозеров, Б. И. Гулик. – Текст : непосредственный // Вісник Східноукр. держ. ун-ту. – 1999. – № 3. – С. 175 – 179.

12. Осенин, Ю. И. Методика решения задач деформирования поверхностных слоев тел тангенциальными силами / Ю. И. Осенин, К. В. Белозеров, Б. И. Гулик. – Текст : непосредственный // Вісник Східноукр. держ. ун-ту. – 1999. – № 2. – С. 23 – 31.

13. Стенд для исследования характеристик взаимодействия элементов трения дискового тормоза / Ю. В. Кривошея, В. В. Бугаенко, И. И. Соснов [и др.] – Текст : непосредственный // Вестник РГУПС. – 2020. – № 1 (77). – С. 83 – 88.

References

1. Izmajlov V. V., Chaplygin S. A. Electrothermal analogy and calculation of the conductivity of discrete contact of machine parts [Elektroteplovaya analogiya i raschet provodimosti diskretnogo kontakta detalej mashin]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie» – Internet magazine «Science of Science»*, 2016, vol. 8, no. 2, Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/26TVN216.pdf> (free access).

2. Mesnyankin S. Y., Vikulov A. G., Vikulov D. G. Modern view on the problems of thermal contacting of solids [Sovremennyy vzglyad na problemy teplovogo kontaktirovaniya tverdyh tel]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Advances in physical sciences*, 2009, vol. 179, no. 9, pp. 945 – 970.

3. Izmailov V. V., Novoselova M. V. *Kontakt tverdyh tel i ego provodimost': monografiya* (Contact of solids and its conductivity: monograph). Tver: TvGTU, 2010, 112 p.

4. Biloborodova I., Sosnov I., Sergienko O. On contact thermal resistance in the system of active effective cooling of the locomotive disk brake, *TEKA Commission of Motorization and Agriculture*, Lublin, Polska Akademia nauk Oddzial w Lubline, 2010, vol. XB, pp. 362 – 370.

5. Yovanovich M. M., Marotta E. E. Thermal Spreading and Contact Resistance, *Heat Transfer Handbook, chapt. 4*, New York: Wiley, 2003, pp. 261 – 393.

6. Chirkin V. S. *Teplofizicheskie svoystva materialov* (Thermophysical properties of materials). Moscow: Gos. izd-vo fizmat. literatury Publ., 1979, 356 p.

7. Kragelsky I. V., Mikhin N. M. *Uzly treniya mashin* (Friction units of machines). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1984, 280 p.

8. *Spravochnik po tribotekhnike* (Handbook of tribotechnics). Ed. M. Hebby, A. V. Chichinadze. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1992, vol. 3, 400 p.

9. Mikhin N. M., Osenin Yu. I. Influence of the stressed state of the contact area of solids on the parameters of roughness and waviness of surfaces [Vliyanie napryazhennogo sostoyaniya oblasti kontakta tverdyh tel na parametry sherohovatosti i volnistosti poverhnostej]. *Respublikanskij m/vedomst. nauchno-tekhnicheskij sbornik «Problemy treniya i iznashivaniya» – Republican i/departmental scientific and technical collection «Problems of friction and wear»*, Kiev: Technique, 1988 (34), pp. 46 – 54.

10. Osenin Yu. I., Krivosheya Yu. V., Chesnokov A. V. The mechanism of noise generation during braking of rolling stock with disc brakes [Mekhanizm vznikhoveniya shuma pri tormozhenii podvizhnogo sostava diskovymi tormozami]. *Trenie i iznos – Friction and Wear*, 2020, no. 2 (41), pp. 241 – 247.

11. Osenin Yu. I., Belozarov E. V., Gulik B. I. Deformation of rough interacting surfaces [Deformirovanie sherohovatogo sloya vzaimodejstvuyushchih poverhnostej]. *Visnik Skhidnoukr. derzh. un-tu – Bulletin of the East Ukrainian state university*, 1999, no. 3, pp. 175 – 179.

12. Osenin Yu. I., Belozarov K. V., Gulik B. I. Methodology for solving problems of deformation of surface layers of bodies by tangential forces [Metodika resheniya zadach deformirovani poverhnostnyh sloev tel tangencial'nyimi silami]. *Visnik Skhidnoukr. derzh. un-tu – Bulletin of the East Ukrainian state university*, 1999, no. 2, pp. 23 – 31.

13. Krivosheya Yu. V., Bugaenko V. V., Sosnov I. I., Malakhov O. V., Malakhova V. V. Stand for studying the characteristics of interaction of friction elements of a disc brake [Stend dlya issledovaniya harakteristik vzaimodejstviya elementov treniya diskovogo tormoza]. *Vestnik RGUPS – Bulletin of RGUPS*, 2020, no. 1 (77), pp. 83 – 88.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кривошея Юрий Владимирович

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДОНИЖТ).

Горная ул., д. 6, г. Донецк, 283018, Донецкая Народная Республика.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», ДОНИЖТ.

Тел.: +38 (071) 333-19-37.

E-mail: krivosheya.drta@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Krivosheya Yuriy Vladimirovich

Donetsk Railway Transport Institute (DRTI).

6, Gornaya st., Donetsk, 283018, Donetsk People's Republic.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Rolling stock of railways», DRTI.

Phone: +38 (071) 333-19-37.

E-mail: krivosheya.drta@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кривошея, Ю. В. Влияние деформаций микрогеометрии поверхности на величину контактного термического сопротивления дискового тормоза / Ю. В. Кривошея. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 11 – 20.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Krivosheya Y. V. Effect of surface microgeometry deformations on the value of the contact thermal resistance of the disc brake. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 3 (43), pp. 11 – 20 (In Russian)

УДК 629.423

И. И. Лакин

АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ), г. Москва, Российская Федерация

МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Аннотация. В статье предлагается метод с использованием математического аппарата теории нечетких множеств при автоматизации управления надежностью локомотивов, так как при написании алгоритмов возникает проблема перехода от не до конца формализованных понятий человеческого общения к формализации программного обеспечения. Описаны примеры применения нечетких множеств при расчете показателей надежности локомотивов. При анализе параметров надежности вручную объем расчетов не позволяет перейти к более сложным алгоритмам. При наличии автоматизированных систем следует для каждого показателя перевозочного процесса, влияющего на его надежность, задать функцию принадлежности к опасному и нормальному состоянию с использованием математического аппарата теории нечетких множеств. Тогда риск наступления опасного события будет оценен вероятностью принадлежности логического утверждения к риску.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, подвижной состав, управление надежностью, нечеткие множества, нечеткая логика.

Igor I. Lakin

CJSC «Transmashholding (TMH)», Moscow, the Russian Federation

MULTI-FACTOR ANALYSIS OF STATISTICAL INFORMATION USING FUZZY SET THEORY TECHNIQUES

Abstract. The article proposes a method of using the mathematical apparatus of the theory of fuzzy sets in automation of the locomotives reliability management, because when writing algorithms there is a problem of transition from not fully formalized concepts of human communication to formalizing software. Examples of the fuzzy sets use in calculating the locomotives reliability are described. When calculating the reliability parameters manually, the volume of calculations does not allow you to move to more complex algorithms. When there are automated systems, it is necessary for each indicator of the transportation process, which affects its reliability, to set the function of belonging to a dangerous and normal value using the mathematical apparatus of the theory of fuzzy sets. Then the risk of a dangerous event will be assessed in probability, taking into account the logical claim to the risk.

Keywords: railway transport, rolling stock, reliability management, fuzzy sets, fuzzy logic.

Цифровые технологии на производстве – одно из ключевых направлений повышения эффективности процессов управления. В локомотивном комплексе по современным подходам создаются киберфизические производственные системы (Cyber Physical Production Systems – CPPS): интегрированные в единую систему бортовые микропроцессорные системы управления (МСУ) с передачей данных в режиме online, бортовые, встроенные, переносные и стационарные деповские автоматизированные системы технического диагностирования (АСТД), автоматизированные системы управления (АСУ) производственными процессами эксплуатации, технического обслуживания и ремонта (ТОиР) локомотивов, АСУ локомотивостроительных и локомотиворемонтных заводов [1, 5 – 9].

В рамках реализации CPPS в локомотивном комплексе диагностические данные МСУ (производители ЛЭС (г. Новочеркасск), ВНИКТИ (г. Коломна), БМЗ (г. Брянск) и др.) уже используются при планировании объема ремонтов в АСУ ТОиР «Сетевой график» (85 СЛД ЛокоТех-Сервис, разработчики: «Инжиниринговый центр «Желдорреммаш», 2050-Интегратор) [1]. Те же МСУ совместно с бортовыми системами автоведения (УСАВП) используются в комплексной системе интервального управления движением поездов на Восточном полигоне ОАО «РЖД» (разработчики НИИАС и АВП Технология). В сервисном локомотивном депо (СЛД) «Братск» на станции «Вихоревка» создана АСУ с функциями ERP и MES, объединившей в себе все имеющиеся в депо АСТД, оборудование с цифровым управлением, автоматизированные рабочие места (АРМы), включая АРМ расшифровки данных МСУ (головной исполнитель – НИИТКД, г. Омск), в результате чего создан прототип цифрового ремонтного депо. Следующий шаг развития системы – автоматизация аналитических задач, включая управление надежностью локомотивов.

В создании CPPS наряду с IT-оборудованием значительную роль играет разработка математического аппарата и высокоинтеллектуального программного обеспечения для МСУ (МСУД, МСУЭ, МСУ-ТП, МСУ-ТЭ и др.), АСТД (реостатные испытания, вибродиагностика, испытательные станции взаимной нагрузки тяговых электродвигателей (ТЭД), стенды испытания отдельных видов оборудования и др.), АСУ (АСУТ, ЭПЛ, АСУ ТОиР, ERP и MES-системы и др.). Возможности современных цифровых технологий ограничиваются IT-оборудованием и заложенными в программное обеспечение аналитическими алгоритмами, основа которого – человеческая логика.

Законы человеческого мышления (законы формальной логики) одним из первых исследовал великий древнегреческий философ Аристотель (IV в. до н. э.). К тому времени уже был выявлен ряд «логических парадоксов», известных нам как «софизмы» (например, «Все, что ты не терял, ты имеешь», «Быстроногий Ахиллес никогда не догонит неторопливую черепаху» и др.). Аристотелю удалось показать несостоятельность большинства из со-

физмов как возникших от формального применения до конца не формализованных понятий (предикатов). Но парадоксы оставались. Например, «Парадокс кучи»: если из кучи зерен убрать одно зерно, то куча останется кучей. В какой момент куча перестанет быть кучей? Проблема была в отсутствии точного определения понятий [2]. Например, высокий человек, длинная дорога, быстрая езда, напряженный трафик и т. д. Искусственное введение порогов ограничивает искусственный интеллект.

«Парадоксы кучи» есть и на железнодорожном транспорте [7]: нет строгого определения тяжеловесного поезда, надежной техники, устаревшего оборудования и др. Искусственно вводимые границы существенно снижают возможности анализа: если тяжеловесный поезд массой 6300 т нельзя пропускать по боковому пути перед руководящим подъемом, то как быть с поездом массой 6299 т? Если установлена скорость 40 км/ч, то будет ли превышением скорость 40,01 км/ч, если электрический аппарат срабатывает за 0,2 с, то следует ли его считать неисправным при срабатывании за 0,21 с? Если допускается ток тягового электродвигателя 1200 А в течение 5 минут, то произойдет ли отказ ТЭД через 5 минут и 1 секунду? Пороговые ограничения приводят к логическим парадоксам и искусственным ограничениям в алгоритмах управления.

Выход из логических парадоксов был предложен в 60-е гг. XX в. выдающимся американским математиком и логиком Лотфи Заде [2, 10], который ввел понятия «нечеткая логика» и «нечеткие множества» (Fuzzy Nets), позволившие в значительной степени связать математику и программирование с присущим человеку интуитивным способом коммуникации. В теории нечетких множеств основным понятием является собственно нечеткое множество A , которое задается множеством входящих в него элементов $x \in X$ и функцией принадлежности $\mu_A(x) \in [0, 1]$ этих элементов к множеству:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}. \quad (1)$$

В примере с тяжеловесным поездом масса поезда x принадлежит множеству возможных масс поезда X : $x \in [0, 7700]$. При массе поезда в 6300 т поезд считается тяжеловесным: $\mu(x \geq 6300) = 1$, а при массе меньше 3000 т является легковесным: $\mu(x \leq 3000) = 0$. Тогда для переходной массы функция принадлежности к тяжеловесным поездам будет такой:

$$\mu(3000 < x < 6300) = (x - 3000) / 3300. \quad (2)$$

В приведенном примере переход от множества нетяжеловесных поездов к тяжеловесным принят линейным (рисунок 1). Однако это требует доказательства.

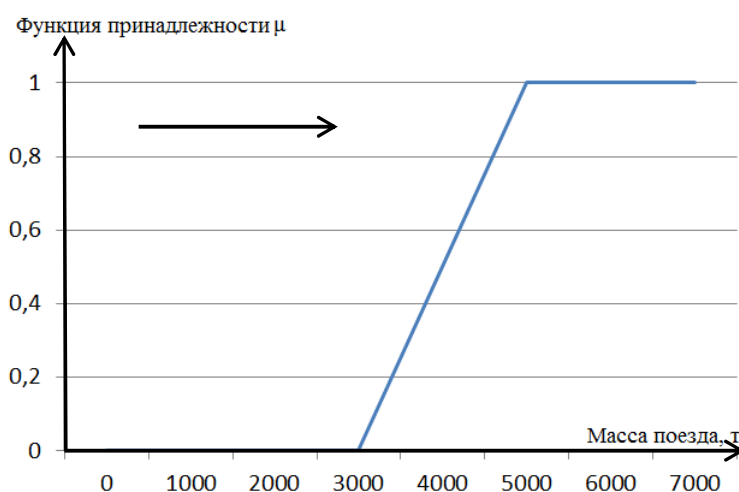


Рисунок 1 – Функция принадлежности массы поезда к нечеткому множеству «Тяжеловесный поезд»

Функция принадлежности в первом приближении может задаваться линейной, как в приведенном примере, или как переходной график инерционного звена второго порядка. Другой подход – по важности принадлежности: если приоритетным является «не прозевать» тяжеловесный поезд, то график функции принадлежности должен быть выпуклым, если наоборот – вогнутым. Самый точный подход – это с учетом протекающих физических процессов. Для примера с током в 1200 А нагрев растет пропорционально квадрату тока: кривая функции принадлежности носит параболический характер. Аналогично следует поступать и с примером, приведенным на рисунке 2.

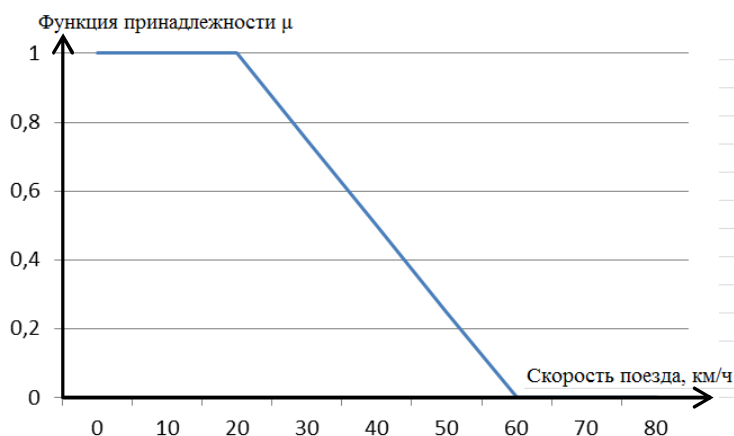


Рисунок 2 – Принадлежность скорости к нарушению скоростного режима на руководящем подъеме

Отказ Q (согласно ГОСТ 27.002-2015 [3] определен как «событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния») может быть «полным или частичным» – сразу появляется нечеткость в измерении надежности в числе отказов. Например, отказ тягового электрического двигателя (ТЭД) может проявиться как необходимость заменить электрическую щетку в коллекторе (в существующей системе за отказ не считается), а может привести к необходимости капитального ремонта (КР). И то и другое будет отказом ТЭД. Если же принять КР ТЭД как за $\mu(\text{КР}) = 1$, то, например, замену якоря можно считать как $\mu(\text{якорь}) = 0,5$, замену моторно-якорного подшипника – как $\mu(\text{МЯП}) = 0,3$, а замену щетки как $\mu(\text{щетка}) = 0,001$. Тогда надежность ТЭД можно оценить как сумму нечетких отказов с отношением к выполненной работе: времени работы, пробегу, тонно-километровой работе или затраченной энергии в киловатт-часах. Проще работу измерять как пробег (млн км): исследования автора показали, что коэффициент корреляции r между возможными показателями работы одной серии локомотива на одном полигоне работы превышает $r = 0,9$.

Пусть в депо эксплуатируются 100 восьмиосных электровоза со среднесуточным пробегом 700 км. Пусть за месяц было произведено 1000 замен электрических щеток, 20 замен якоря, 10 замен моторно-якорных подшипников и 5 ТЭД после отказа подлежали КР. Общий пробег ТЭД в депо за месяц составил $L = 100 \cdot 30 \cdot 700 \cdot 8 / 1000000 = 16,8$ млн км. При этом в «четкой логике» произошло $N = 20 + 10 + 5 = 35$ отказов, а «четкая» наработка на отказ $\lambda_{\text{ч}}$ составила: $\lambda_{\text{ч}} = N/L = 35 / 16,8 = 2,08$ отказа на 1 млн км. Учет отказов с применением теории нечетких множеств позволяет более адекватно оценивать надежность ТЭД:

$$\lambda_{\text{н}} = (1000 \cdot 0,001 + 20 \cdot 0,5 + 10 \cdot 0,3 + 5 \cdot 1) / 16,8 = 19 / 16,8 = 1,13 \text{ отказа на млн км.}$$

Микропроцессорные системы управления локомотивов (МСУ) имеют два полукомплекта – повышение надежности достигается за счет дублирования. Если один полукомплект отказал, то машинист переключением тумблера переводит работу МСУ на второй полукомплект. При заходе локомотива на ПТОЛ отказавший полукомплект восстанавливается. С точки зрения эксплуатационной надежности локомотива отказа не было. Но для конструк-

торов МСУ этот отказ необходимо учесть, чтобы анализировать надежность МСУ. Нечеткая логика позволяет устранить проблему, придав каждому виду отказа числовое значение в диапазоне от 0 до 1 в зависимости от стоимости ремонта и последствий: если отказ МСУ привел к задержке перевозочного процесса, то нечеткий отказ должен учитывать не только стоимость восстановления, но и стоимость потерь перевозочного процесса.

Пример. Если применительно к локомотивам в предыдущем примере МСУ отказал 50 раз с успешным переходом на второй полукомплект (вес отказа пусть $\mu = 0,1$), то в четкой логике число отказов будет

$$\lambda_{\text{ч}} = N/L = 0 / 16,8 = 0 \text{ отказов на 1 млн км (отказы оказались не видны),}$$

а в нечеткой логике –

$$\lambda_{\text{н}} = 50 \cdot 0,1 / 16,8 = 5/16,8 = 0,3 \text{ отказа на млн км.}$$

В сервисной группе компаний «ЛокоТех» во всех 85 сервисных локомотивных депо внедрена автоматизированная система управления техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) локомотивов АСУ «Сетевой график» [5], в которой обнаруженные отказы или даже просто замечания по работе локомотива из всех источников (бортовой журнал формы ТУ-152, МСУ, визуальная приемка локомотива в ремонт и др.) фиксируются в электронном журнале ТУ-28Э, после чего мастер назначает слесарям сверхцикловые дополнительные работы, по каждой из которых регистрируются трудовые затраты, расход запасных частей и материалов (в штуках и рублях). Таким образом, можно всегда рассчитать стоимость устранения любого отказа. Если при этом произошел заход локомотива на неплановый ремонт, то следует добавить стоимость доставки локомотива в депо и потери перевозочного процесса (пока такой методики на железнодорожном транспорте нет). Стоимость капитального ремонта, принимаемого за отказ $\mu = 1$, также известна и утверждена на ценовой комиссии ОАО «РЖД». Таким образом, предлагаемая технология учета отказов с использованием теории нечетких множеств практически реализуема.

В ОАО «РЖД» в информационной системе «КАСАНТ» проблеме четкого понятия «отказ» предложено решать через введение категории отказа (1-я, 2-я, 3-я) в зависимости от последствий для перевозочного процесса. Но проблема осталась. Например, отказом первой категории считается опоздание пассажирского поезда более чем на 5 минут. Таким образом, опоздание поезда на 4 мин 59 с уже не будет отказом первого рода.

Следующий шаг использования теории нечетких множеств – это нечеткая логика. При управлении надежностью она прежде всего применима при управлении рисками, где риск оценивается через вероятность Q наступления опасного события. Риск оценивается через наличие событий, приводящих к рискам. Например, если в цеху нарушится техника безопасности, то есть риск травмы, если произошла частичная потеря работоспособности локомотива, то есть риск опоздания поезда, если ТЭД работал с током 1200 А более 5 минут, то есть риск пробоя изоляции, если напряжение в контактной сети было завышенным, то есть риск кругового огня по коллектору ТЭД. Если электрический аппарат срабатывает медленней положенного, то есть риск его отказа. Очевидно, что все приведенные логические построения трудно использовать в АСУ без применения нечетких множеств. И наоборот: введение функций принадлежности по каждому используемому понятию сразу делает задачу управления рисками возможной к автоматизации и использованию в АСУ как фоновый процесс мониторинга рисков с информированием при появлении риска.

Применительно к примерам на рисунках 1 и 2 логическое утверждение будет выглядеть так: если нарушены весовая норма поезда (событие A) или скоростной режим (событие B), то есть риск R отказа тяговых электродвигателей в течение сорока ближайших дней (возможен пробой изоляции). В четкой логике это означает:

$$\text{If } A \text{ or } B \text{ then } R = 1. \quad (3)$$

В нечеткой логике это выражение будет иметь вид:

$$R = \mu_A(m) + (1 - \mu_A(m)) \cdot \mu_B(v), \quad (4)$$

где $m \in M$ – возможные массы поезда;

$v \in V$ – возможные скорости поезда;

$\mu_A \in [0, 1]$ и $\mu_B \in [0, 1]$ – функции принадлежности текущих значений x и y к опасным событиям A (нарушение весовой нормы) и B (нарушение скоростного режима).

Формула (4) является обратимой и ее можно записать в виде:

$$R = \mu_B(v) + (1 - \mu_B(v)) \cdot \mu_A(m). \quad (5)$$

Например, если весовая норма нарушена как $\mu_A(m) = 0,75$, а скоростной режим нарушен как $\mu_B(v) = 0,45$, то

$$R = 0,75 + (1 - 0,75) \cdot 0,45 = 0,45 + (1 - 0,45) \cdot 0,75 = 0,8625. \quad (6)$$

В настоящее время для оценки эффективности эксплуатации и надежности локомотивов для большинства параметров работы введены «четкие» допуски, что удобно при ручной обработке данных. В АСУ возможен переход от «четких» бинарных понятий к нечетким множествам с плавно меняющимися значениями заданных функций принадлежности (в пределах от 0 до 1), в том числе и для понятия «отказ» в зависимости от его последствий, что существенно повышает объективность мониторинга надежности локомотива и безопасности движения. При этом логические утверждения следует формировать по правилам теории вероятности. По предложенному методу в ТМХ ведутся научно-практические исследования для комплексного управления надежностью выпускаемого и обслуживаемого по контракту жизненного цикла подвижного состава. В основе процесса должен быть автоматизированный непрерывный фоновый мониторинг процессов эксплуатации, технического обслуживания и ремонта локомотивов, инкапсулированный в существующие АСУ, с использованием методов теории нечетких множеств и нечеткой логики.

Список литературы

1. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К. В. Липа, А. А. Белинский, В. Н. Пустовой [и др.]. – Москва : Локомотивные технологии, 2015. – 212 с. – Текст : непосредственный.
2. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – Москва : Мир, 1976. – 166 с. – Текст : непосредственный.
3. ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения». – Москва : Стандартинформ, 2016. – 63 с. – Текст : непосредственный.
4. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – Москва : Академия, 2003. – 464 с. – Текст : непосредственный.
5. Лакин, И. К. Автоматизированная система управления эксплуатационным жизненным циклом локомотивов / И. К. Лакин, И. В. Пустовой, А. А. Аболмасов. – Текст : непосредственный // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава : труды всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием / ДЦВ Красноярской железной дороги. – Красноярск, 2020. – С. 223 – 242.
6. Аболмасов, А. А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аболмасов Алексей Александрович; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 2017. – 180 с. – Текст : непосредственный.
7. Лакин, И. И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных

дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание степени кандидата технических наук / Лакин Игорь Игоревич; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 2016. – 195 с. – Текст : непосредственный.

8. Пустовой, И. В. Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов : специальность 05.02.22 «Организация производства (транспорт)» : диссертация на соискание степени кандидата технических наук / Пустовой Илья Владимирович; Омский гос. университет путей сообщения. – Омск, 2018. – 183 с. – Текст : непосредственный.

9. Лакин, И. К. Разработка теории и программно-технических средств комплексной автоматизированной справочно-информационной и управляющей системы локомотивного депо : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание степени доктора технических наук / Лакин Игорь Капитонович; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 1997. – 377 с. – Текст : непосредственный.

10. Zadeh L. A. Fuzzy Sets – NY, *Information and control*, 1965, no. 8, pp. 338 – 353.

References

1. Lipa K. V., Belinsky A. A., Pustovoy V. N., Lyangasov S. L., Lakin I. K., Abolmasov A. A. and others. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov expluatacii locomotivov. Teoria i praxica* (Monitoring the technical condition and modes of operation of locomotives. Theory and practice). Moscow: Locomotivniye Tekhnologii Publ., 2015, 212 p.

2. Zadeh L. A. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primemenie k prinyatiyu priblizhennih resheniy* (The concept of linguistic variable and its application to the adoption of close decisions). Moscow.: Mir Publ., 1976, 166 p.

3. GOST 27.002-2015 «Nadezhnost' v tekhnike (SSNT). Terminy i opredeleniia» (National Standard of Russia GOST 27.002-2015 «Reliability in technology (SSNT). Terms and definitions»). Moscow, Standartinform, 2016, 63 p.

4. Ventcel E. S., Ovcharov V. A. *Teoriya veroyatnosti i eyo inzhenernye prilozhenia* (Probability theory and its engineering applications). Moscow: Academy Publ., 2003, 464 p.

5. Lakin I. K., Pustovoy I. V., Abolmasov A. A. Automated Locomotive Life Cycle Management System [Avtomatizirovannaya sistema upravleniya expluatsionnym zhiznennim tsiklom lokomotivov]. *Ekspluatatsiya i obsluzhivanie elektronnoy i mikroprotsessornoy oborudovaniya tiagovogo podvizhnogo sostava : trudy vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem* (Operation and maintenance of electronic and microprocessor traction rolling stock equipment: works of the All-Russian Scientific and Practical Conference with Inter-People's Participation). – Krasnoyarsk, 2020, pp. 223 – 242. – ISBN 978-5-905401-12-1.

6. Abolmasov A. A. *Upravlenie tekhnicheskimi sostoyaniyami tyagovogo podvizhnogo sostava v usloviyah servisnogo obsluzhivaniya* (Management of the technical condition of traction rolling stock in service conditions). Ph. D. thesis, Moscow, Moscow Railway State University, 2017, 180 p.

7. Lakin I. I. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyniya lokomotivov po dannim bortovih apparatno-programmnykh kompleksov* (Monitoring the technical condition of locomotives according to on-board hardware and software systems). Ph. D. thesis, Moscow, Moscow Railway State University, 2016, 195 p.

8. Pustovoy I. V. *Razrabotka informatsionno-dinamicheskoy modeli upravleniya tekhnicheskimi obsluzhivaniyami i remontom locomotivov* (Develop an information-dynamic model for managing service maintenance and repairing locomotives). Ph. D. thesis, Omsk, Omsk State Transport University, 2018, 183 p.

9. Lakin I. K. *Razrabotka teorii i programmno-tekhnicheskikh sredstv kompleksnoi avtomatizirovannoy spravочно-informatsionnoy i upravlyaiushchei sistemy lokomotivnogo depo* (Development of theory and software tools of a comprehensive automated reference information and control system of the locomotive depot). Doctoral thesis, Moscow, Moscow Railway State University, 1997, 377 p.

10. Zadeh L. A. Fuzzy Sets – NY, *Information and control*, 1965, no. 8, pp. 338 – 353.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лакин Игорь Игоревич
АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ).
119048, , ул. Ефремова, д.10, г. Москва, Россий-
ская Федерация.
Руководитель направления, кандидат техниче-
ских наук.
Тел.: +7 (916) 383-6443.
E-mail: Lakin16@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Lakin Igor Igorevich
CJSC Transmashholding (TMH).
119048, Efremov st., 10, Moscow, the Russian Fed-
eration.
Head of direction, Ph.D. in Engineering.
Phone: +7 (916) 383-6443.
E-mail: Lakin16@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лакин, И. И. Многофакторный анализ статис-
тической информации с использованием методов теории
нечетких множеств / И. И. Лакин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). –
С. 20 – 27.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lakin I. I. Multi-Factor Analysis of Statistical Infor-
mation Using Fuzzy Set Theory Techniques. Journal of
Transsib Railway Studies, 2020, no. 3 (43), pp. 20 – 27 (In
Russian).

УДК 621.331:621.311.44: 621.316.935.2

Р. Б. Скоков, М. М. Никифоров, Ю. В. Кондратьев

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

НОРМАТИВНЫЕ ОСНОВЫ СТАНДАРТА ПО ВЫБОРУ СХЕМ И ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СГЛАЖИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аннотация. В статье обоснована необходимость обновления нормативной документации по выбору
сглаживающих устройств для тяговых подстанций постоянного тока. Сформулированы общие требования к
сглаживающим устройствам, требования по охране труда и электромагнитной безопасности. Рассмотрены
основные схемы сглаживающих устройств, применяемых на тяговых подстанциях постоянного тока. Разра-
ботаны рекомендации по выбору схем сглаживающих устройств при модернизации и строительстве новых
тяговых подстанций с учетом их энергетической эффективности.

Ключевые слова: сглаживающие устройства, требования к сглаживающим устройствам, схемы сглажи-
вающих устройств, показатели эффективности сглаживающих устройств.

Ruslan B. Skokov, Michail M. Nikiforov, Yuriy V. Kondratiev

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

REGULATORY FRAMEWORK OF THE STANDARD FOR THE SELECTION OF SCHEMES AND BASIC PARAMETERS OF THE SMOOTHING DEVICES OF RAILROAD TRACTION DC SUBSTATIONS

Abstract. The article substantiates the need to update the normative documentation for the selection of smoothing
devices for DC traction substations. General requirements for smoothing devices, labor protection and electromagnetic
safety requirements are formulated. The main schemes of smoothing devices used at DC traction substations are con-
sidered. Recommendations have been developed for the selection of smoothing device schemes for the modernization
and construction of new traction substations, taking into account their energy efficiency.

Keywords: anti-aliasing devices, anti-aliasing device requirements, anti-aliasing device schemes.

Тяговая сеть электрических железных дорог постоянного тока является источником
электромагнитного влияния, вызывая в смежных коммуникациях опасные и мешающие
напряжения. Одними из основных технических средств, используемых для снижения влия-
ния тяговой сети постоянного тока на смежные устройства, являются сглаживающие устрой-

ства (СУ). СУ системы тягового электроснабжения постоянного тока по ГОСТ 32895–2014 – это устройство, предназначенное для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения.

Задача по снижению расхода электроэнергии на тягу поездов, в том числе за счет снижения потерь электроэнергии в оборудовании системы тягового электроснабжения, является одной из актуальных для ОАО «Российские железные дороги» [1, 2]. Анализ мероприятий, разработанных для повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в ходе энергетического обследования электротяги [3, 4], показал, что снижение потребления электроэнергии на тяговых подстанциях постоянного тока может быть достигнуто за счет упрощения схем и оптимизации параметров СУ [5 – 7]. При этом действующим в настоящее время нормативным документом [8] рекомендованы к использованию на участках постоянного тока двухзвенные СУ.

Кардинальные изменения, произошедшие за 50 лет после утверждения Правил... [8] в устройствах связи, СЦБ и тягового электроснабжения, определили необходимость разработки нового стандарта, позволяющего учесть современные условия эксплуатации СУ. Этот стандарт должен обеспечивать выбор основных параметров СУ с учетом широкого внедрения на сети железных дорог эквивалентных двенадцатифазных статических выпрямителей, замены воздушных линий связи на кабельные и волоконно-оптические, внедрения новых типов автоблокировки с более высокой степенью помехозащищенности, применения быстродействующих выключателей, для которых регламентирована работа в безындуктивных цепях, широкого использования разрядных устройств для облегчения работы быстродействующих выключателей контактной сети.

В целом разработка стандарта позволяет выдержать единую техническую политику ОАО «РЖД» в области применения СУ и снизить издержки при проектировании. Перечислим основные разделы, которые должны быть отражены в национальном стандарте на СУ:

- общие требования к СУ;
- требования к электромагнитной безопасности;
- требования по обеспечению охраны труда;
- показатели эффективности СУ.

Тяговые подстанции системы тягового железнодорожного электроснабжения постоянного тока напряжением 3 кВ, а также пункты преобразования напряжения постоянного тока с дополнительным проводом напряжением 6 кВ, предназначенные для преобразования напряжения дополнительного провода в напряжение контактной сети, должны быть оборудованы СУ.

В общем случае СУ должно обеспечивать возможность получения достаточного сглаживающего действия для нормального функционирования устройств связи, системы централизации и блокировки, минимальные потери электрической энергии, малую стоимость устройства и минимум эксплуатационных расходов, простоту устройства и обслуживания.

Обеспечение необходимой электромагнитной совместимости СУ должно выполняться при длительности воздействия влияющих напряжений и токов 0,3 с и более вне зависимости от типов обращающегося на участке электроподвижного состава.

С целью обеспечения минимума потерь электрической энергии и эксплуатационных расходов необходимо выбирать наиболее простые схемы СУ. При этом в последовательной цепи СУ должны использоваться такие элементы, которые обеспечат прохождение постоянной составляющей тягового тока с минимальными потерями электрической энергии. В параллельной части должны использоваться такие элементы, которые исключат прохождение постоянной составляющей тягового тока между плюсовой и минусовой шинами.

Для обеспечения эффективности работы СУ полное активное сопротивление соединительных проводов (от плюсовой до минусовой шины), включая все контактные соединения, не должно превышать 0,01 Ом. При этом не допускается применение кабелей с броней или в свинцовой оболочке, а также прокладка кабелей в стальных трубах, так как при этом заметно возрастает реактивное сопротивление для токов высших гармоник. Ошиновка должна быть

выполнена из луженой медной шины. Недопустимо также применение алюминиевых шин из-за окисления контактных соединений.

Активное сопротивление резонансных контуров фильтр-устройства вместе с соединительными проводами (от плюсовой до минусовой шины) не должно превышать значений, указанных в таблице 1.

Таблица 1 – Допустимые значения активного сопротивления резонансных контуров

Частота контура, Гц	100	200	300	400	600	900	1200
Активное сопротивление, Ом	0,45	0,46	0,47	0,48	0,50	0,55	0,70

Активное сопротивление аperiodической параллельной части вместе с соединительными проводами (от плюсовой до минусовой шины) должно быть не более 0,2 Ом и не должно зависеть от частоты в диапазоне 100 – 1800 Гц. Для обеспечения точной настройки фильтр-устройства конструкцией катушек индуктивности резонансных контуров должно быть предусмотрено плавное регулирование индуктивности. При выборе схем и параметров СУ необходимо учитывать отклонение емкости и индуктивности элементов параллельной и последовательной частей в пределах допустимых значений.

Для обеспечения электромагнитной совместимости СУ должны удовлетворять следующим требованиям по ГОСТ 34062 – 2017:

а) среднее значение психофизического напряжения на выходе тяговой подстанции должно быть не более:

при воздушных линиях связи – 4 В (5 В – при интегральной вероятности 0,95);

кабельных линиях связи – 20 В (30 В – при интегральной вероятности 0,95);

оптоволоконных линиях связи – не нормируется в связи с их высокой помехозащищенностью;

б) действующее значение гармоник частотой 100 Гц в выпрямленном напряжении при кодовой автоблокировке частотой 50 Гц должна быть не более 100 В;

в) действующее значение гармоник частотой 600 Гц в выпрямленном напряжении при автоблокировке с тональными рельсовыми цепями, работающими в диапазоне частот от 400 до 800 Гц, должно быть не более 2,3 В [9];

г) действующее значение гармоник частотой от 4000 до 5000 Гц в выпрямленном напряжении при автоблокировке с рельсовыми цепями, работающими в диапазоне частот от 4545 до 5555 Гц, не нормируется в связи с обеспечением снижения действующего значения тягового тока на этих частотах по ГОСТ Р 55364–2012 за счет входного реактивного сопротивления электрической схемы электровоза и полного сопротивления системы тягового железнодорожного электроснабжения постоянного тока.

Для тяговых подстанций, у которых примыкающие межподстанционные зоны оборудованы различными типами автоблокировки, требования п. б – г действуют одновременно. Для подстанций, у которых примыкающие межподстанционные зоны оборудованы одним и тем же типом автоблокировки, действует только один из п. б – г.

Следует отметить, что соблюдение перечисленных выше требований допускается обеспечивать не только схемой и параметрами СУ, но и иными мерами (например, конструкцией статических преобразователей).

Схема замещения цепи постоянного тока для токов высших гармоник при использовании однозвенного и двухзвенного СУ представлена на рисунке 1.

Результирующее сопротивление цепи коммутации состоит из активного R_v и реактивного $X_{v(n)}$ сопротивлений. При выборе схем и параметров СУ допускается не учитывать активное сопротивление R_v .

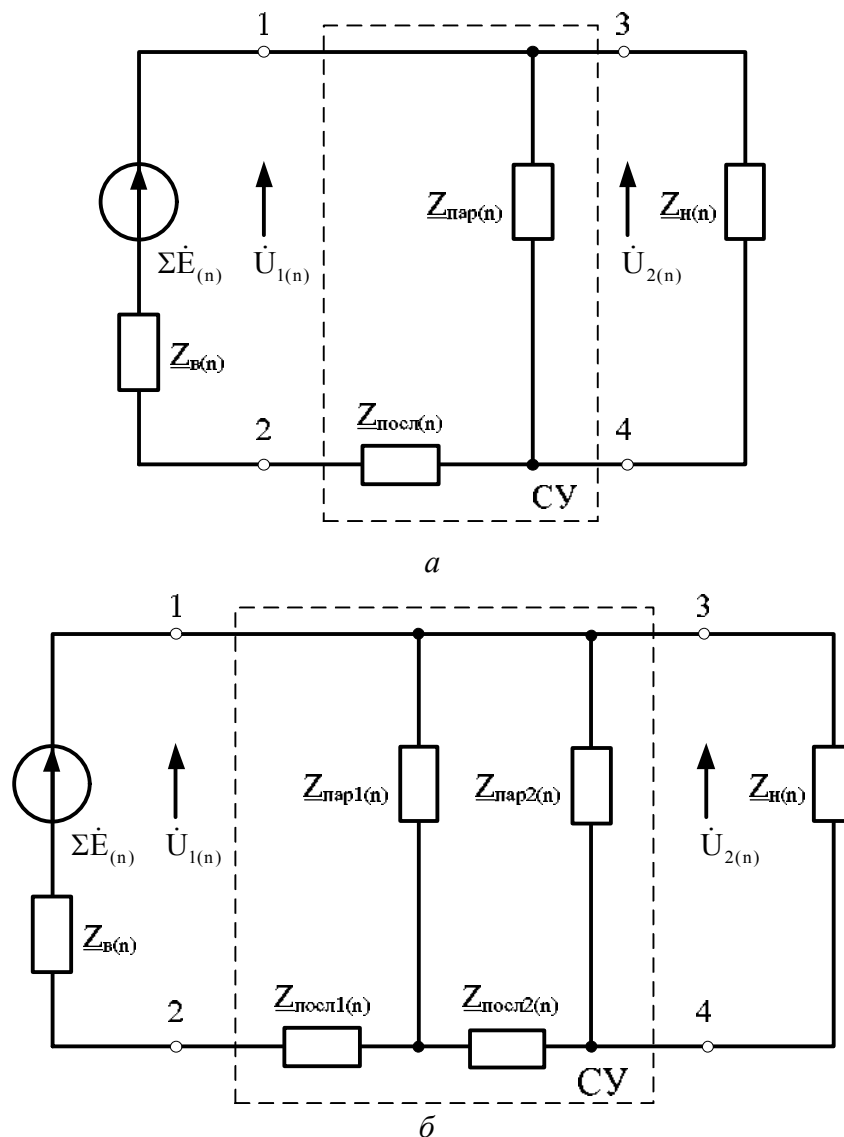


Рисунок 1 – Схема замещения цепи постоянного тока для токов высших гармоник при использовании однозвенного (а) и двухзвенного (б) сглаживающих устройств

На рисунке 1 приведены следующие обозначения: $\dot{E}_{(n)}$ – значение ЭДС n -й гармоники выпрямленного напряжения; $\dot{U}_{1(n)}$ – действующее значение n -й гармоники выпрямленного напряжения на выходе статического преобразователя (входе СУ); $\dot{U}_{2(n)}$ – действующее значение n -й гармоники выпрямленного напряжения на выходе тяговой подстанции (выходе СУ); $Z_{\text{посл}(n)}$, $Z_{\text{пар}(n)}$ – сопротивление соответственно последовательной и параллельной частей СУ; $Z_{\text{в}(n)}$ – результирующее сопротивление цепи коммутации статического преобразователя; $Z_{\text{н}(n)}$ – сопротивление цепи нагрузки, включающее в себя сопротивления электрической схемы электроподвижного состава и системы тягового железнодорожного электропитания постоянного тока.

Результирующее индуктивное сопротивление цепи коммутации статического преобразователя зависит от индуктивного сопротивления питающей системы, параметров понижающего и преобразовательного трансформаторов и определяется по формуле, Ом:

$$X_{в(n)} = \left(\frac{1}{S_{к.з}} + \frac{u_{к.п}}{100k_{п}S_{н.п}} + \frac{u_{к.т}}{100k_{т}S_{н.т}} \right) 3U_2^2 n, \quad (1)$$

где $S_{к.з}$ – мощность короткого замыкания на шинах высшего напряжения тяговой подстанции (в максимальном режиме работы питающей сети);

U_2 – фазное напряжение вентильной обмотки преобразовательного трансформатора.

Для эквивалентных шестифазных нулевых выпрямителей $U_2 = 3,02$ кВ; для эквивалентных двенадцатифазных выпрямителей с параллельным соединением мостов и для эквивалентных шестифазных мостовых выпрямителей $U_2 = 1,51$ кВ; для эквивалентных двенадцатифазных выпрямителей с последовательным соединением мостов $U_2 = 0,755$ кВ;

$S_{н.п}$, $S_{н.т}$ – номинальные мощности соответственно понижающего и преобразовательного трансформаторов, МВ·А;

$u_{к.п}$, $u_{к.т}$ – напряжения короткого замыкания соответственно понижающего и преобразовательного трансформатора, %;

$k_{п}$, $k_{т}$ – количество параллельно включенных понижающих и преобразовательных трансформаторов соответственно.

При выборе схемы и параметров СУ результирующее индуктивное сопротивление цепи коммутации статического преобразователя необходимо учитывать для случая параллельной работы всех понижающих и преобразовательных трансформаторов тяговой подстанции.

Результирующее индуктивное сопротивление цепи коммутации статического преобразователя соединяется последовательно с индуктивным сопротивлением последовательной части СУ. При этом напряжение гармоник n -го порядка на выходе выпрямителя $\dot{U}_{1(n)}$ всегда несколько меньше ЭДС этих гармоник $\dot{E}_{(n)}$, В:

$$U_{1(n)} = \frac{X_{посл(n)}}{X_{посл(n)} + X_{в(n)}} E_{(n)}, \quad (2)$$

где $X_{посл(n)}$ – индуктивное сопротивление последовательной части СУ.

При использовании в последовательной части в качестве индуктивного сопротивления реактора с индуктивностью 6 мГн и более результирующее индуктивное сопротивление цепи коммутации статического преобразователя $X_{в(n)}$ при выборе схем и параметров СУ допускается не учитывать.

Коэффициент сглаживания n -й гармоники выпрямленного напряжения для однозвенного СУ определяется по формуле:

$$K_{(n)} = \frac{U_{1(n)}}{U_{2(n)}} = \left| 1 + \frac{Z_{посл(n)}}{Z_{пар(n)}} + \frac{Z_{посл(n)}}{Z_{н(n)}} \right|. \quad (3)$$

При выборе схем и параметров СУ необходимо использовать минимальное значение коэффициента сглаживания однозвенного СУ, которое определяется для случая отсутствия тяговой нагрузки на межподстанционной зоне по формуле:

$$K_{(n)} = \frac{U_{1(n)}}{U_{2(n)}} = \left| 1 + \frac{Z_{посл(n)}}{Z_{пар(n)}} \right|. \quad (4)$$

Коэффициент сглаживания n -й гармоники выпрямленного напряжения для двухзвенного СУ определяется по выражению:

$$K_{(n)} = \frac{U_{1(n)}}{U_{2(n)}} = \left| 1 + \frac{Z_{\text{посл}1(n)}}{Z_{\text{пар}1(n)}} \right| \left| 1 + \frac{Z_{\text{посл}2(n)}}{Z_{\text{пар}2(n)}} \right|. \quad (5)$$

Результирующий коэффициент сглаживания n -й гармоники выпрямленного напряжения определяется по уравнению:

$$K_{\text{рез}} = \frac{U_{1\text{nc}}}{U_{2\text{nc}}} = \frac{\sqrt{\sum_n (U_{1(n)} p_{(n)})^2}}{\sqrt{\sum_n (U_{2(n)} p_{(n)})^2}} = \frac{\sqrt{\sum_n (U_{1(n)} p_{(n)})^2}}{\sqrt{\sum_n (U_{1(n)} / K_{(n)} p_{(n)})^2}}, \quad (6)$$

где $U_{1\text{nc}}$ – психофизическое напряжение на выходе статического преобразователя (входе СУ), В;

$U_{2\text{nc}}$ – психофизическое напряжение на выходе тяговой подстанции (выходе СУ), В;

$p_{(n)}$ – коэффициент акустического воздействия гармоники n -го порядка (значения коэффициента приведены в таблице 2).

Таблица 2 – Коэффициент акустического воздействия гармоники n -го порядка

n	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$p_{(n)}$	0,0089	0,0891	0,295	0,484	0,661	0,794	0,902	1,000	1,072	1,122
n	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
$p_{(n)}$	1,072	1,000	0,955	0,905	0,861	0,824	0,791	0,760	0,731	0,705

Для обеспечения эффективности работы СУ и выполнения норм электромагнитной совместимости могут быть использованы следующие схемы СУ:

- двухзвенное резонансно-апериодическое СУ Западно-Сибирской железной дороги;
- двухзвенное резонансно-апериодическое СУ разработки ВНИИЖТа;
- однозвенное резонансно-апериодическое СУ с резонансным контуром 100 Гц;
- однозвенное апериодическое СУ.

Схема двухзвенного резонансно-апериодического СУ Западно-Сибирской железной дороги приведена на рисунке 2.

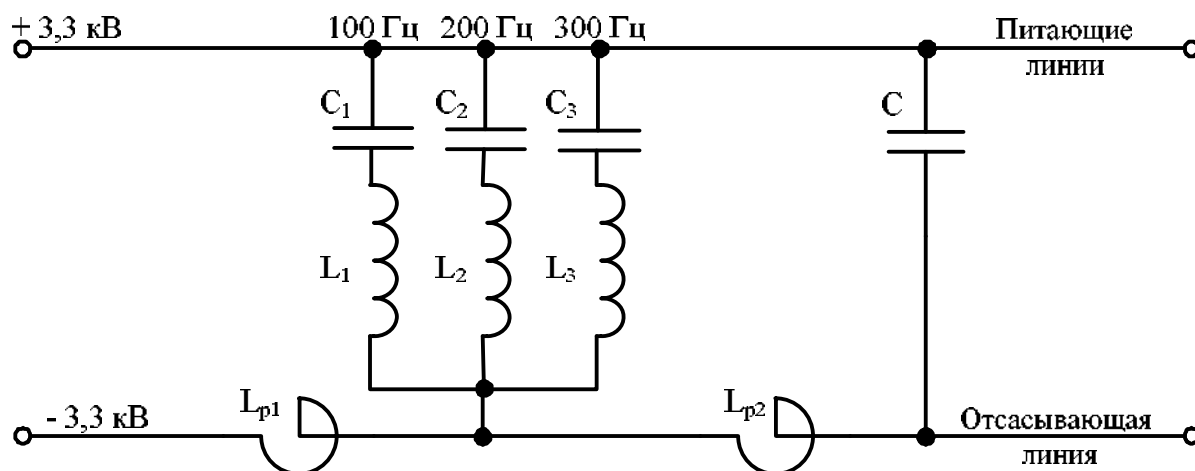


Рисунок 2 – Схема двухзвенного резонансно-апериодического СУ Западно-Сибирской железной дороги:
 L_1 и C_1 , L_2 и C_2 , L_3 и C_3 – индуктивности и емкости резонансных контуров 100, 200 и 300 Гц соответственно;
 L_{p1} и L_{p2} – индуктивности реакторов первого и второго звеньев соответственно;
 C – емкость аperiодической части второго звена

Коэффициент сглаживания n -й гармоники выпрямленного напряжения для данного СУ определяется по формуле (5).

Сопротивление последовательной части первого звена для n -й гармоники выпрямленного напряжения определяется по соотношению:

$$\underline{Z}_{\text{посл1}(n)} = R_{p1} + j\omega_{(n)} \cdot L_{p1}, \quad (7)$$

где R_{p1} – активное сопротивление реактора первого звена;

$\omega_{(n)}$ – угловая частота n -й гармоники выпрямленного напряжения, определяется по формуле:

$$\omega_{(n)} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot n, \quad (8)$$

где f – частота питающей сети (принимается равной 50 Гц).

Сопротивление параллельной части первого звена определяется по уравнению:

$$\underline{Z}_{\text{пар1}(n)} = \left[\left(R_1 + j \left(\omega_{(n)} \cdot L_1 - \frac{1}{\omega_{(n)} \cdot C_1} \right) \right)^{-1} + \left(R_2 + j \left(\omega_{(n)} \cdot L_2 - \frac{1}{\omega_{(n)} \cdot C_2} \right) \right)^{-1} + \left(R_3 + j \left(\omega_{(n)} \cdot L_3 - \frac{1}{\omega_{(n)} \cdot C_3} \right) \right)^{-1} \right]^{-1}, \quad (9)$$

где R_1 , R_2 , R_3 – активные сопротивления резонансных контуров 100, 200 и 300 Гц соответственно (принимаются в соответствии с данными таблицы 1).

Сопротивление последовательной части второго звена определяется по формуле:

$$\underline{Z}_{\text{посл2}(n)} = R_{p2} + j\omega_{(n)} \cdot L_{p2}, \quad (10)$$

где R_{p2} – активное сопротивление реактора второго звена.

Сопротивление параллельной части второго звена определяется по выражению:

$$\underline{Z}_{\text{пар}(n)} = R_C - j \frac{1}{\omega_{(n)} \cdot C}, \quad (11)$$

где R_C – активное сопротивление аperiodической параллельной части второго звена (принимаются по данным таблицы 1).

Схема двухзвенного резонансно-аperiodического СУ ВНИИЖТа приведена на рисунке 3.

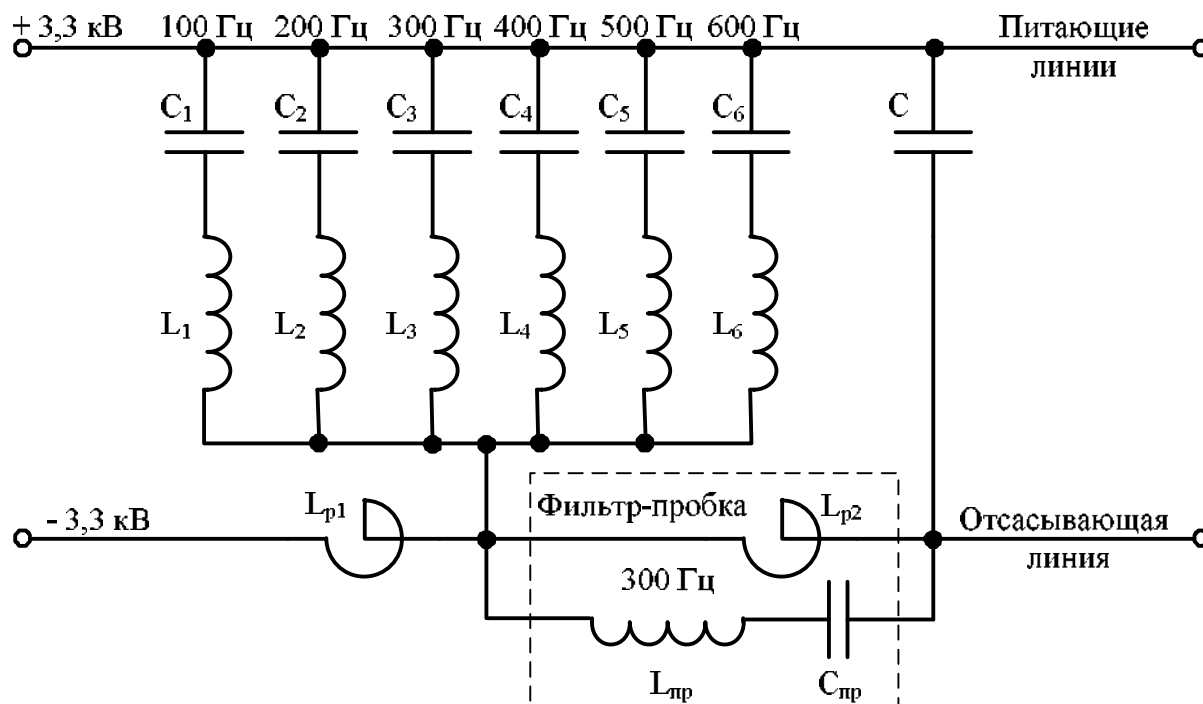


Рисунок 3 – Схема двухзвенного резонансно-аperiodического СУ ВНИИЖТа: L_1 и C_1 , L_2 и C_2 , L_3 и C_3 , L_4 и C_4 , L_5 и C_5 , L_6 и C_6 – индуктивности и емкости резонансных контуров 100, 200, 300, 400, 500, 600 Гц соответственно; $L_{\text{пр}}$ и $C_{\text{пр}}$ – индуктивности и емкости фильтр-пробки, настроенной на частоту 300 Гц, состоящей из реактора второго звена и резонансного контура

Коэффициенты сглаживания n -й гармоники выпрямленного напряжения и сопротивления последовательной части первого звена и параллельной части второго звена для данного СУ определяются по формулам (5), (7) и (11) соответственно.

Сопротивление параллельной части первого звена рассчитывается по уравнению:

$$\underline{Z}_{\text{пар}1(n)} = \left[\left(R_1 + j \left(\omega_{(n)} \cdot L_1 - \frac{1}{\omega_{(n)} \cdot C_1} \right) \right)^{-1} + \left(R_2 + j \left(\omega_{(n)} \cdot L_2 - \frac{1}{\omega_{(n)} \cdot C_2} \right) \right)^{-1} + \right. \\ \left. + \left(R_3 + j \left(\omega_{(n)} \cdot L_3 - \frac{1}{\omega_{(n)} \cdot C_3} \right) \right)^{-1} + \left(R_4 + j \left(\omega_{(n)} \cdot L_4 - \frac{1}{\omega_{(n)} \cdot C_4} \right) \right)^{-1} + \right. \\ \left. + \left(R_5 + j \left(\omega_{(n)} \cdot L_5 - \frac{1}{\omega_{(n)} \cdot C_5} \right) \right)^{-1} + \left(R_6 + j \left(\omega_{(n)} \cdot L_6 - \frac{1}{\omega_{(n)} \cdot C_6} \right) \right)^{-1} \right]^{-1}, \quad (12)$$

где $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ – активные сопротивления резонансных контуров 100, 200, 300, 400, 500, 600 Гц соответственно (принимаются в соответствии с данными таблицы 1).

Сопротивление последовательной части второго звена определяется по формуле:

$$Z_{\text{посл}2(n)} = \left[\left(R_{\text{пр}} + j \left(\omega_{(n)} \cdot L_{\text{пр}} - \frac{1}{\omega_{(n)} \cdot C_{\text{пр}}} \right) \right)^{-1} + \frac{1}{j2\pi \cdot f \cdot n \cdot L_{p2}} \right]^{-1}, \quad (13)$$

где $R_{\text{пр}}$ – активное сопротивление последовательно соединенных емкостного и индуктивного контуров фильтр-пробки (принимается в соответствии с данными таблицы 1).

Схема однозвенного резонансно-апериодического СУ с резонансным контуром 100 Гц представлена на рисунке 4.

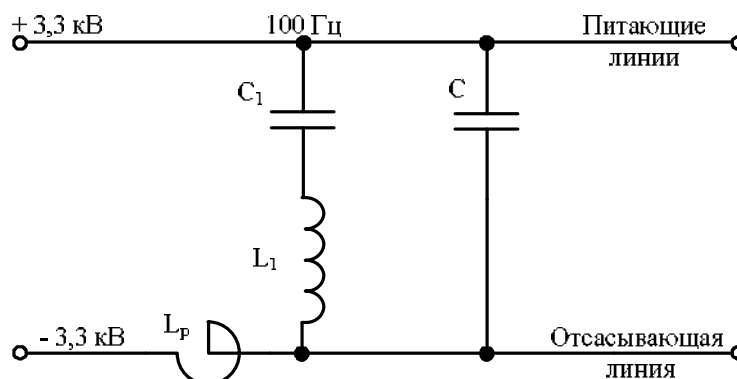


Рисунок 4 – Схема однозвенного резонансно-апериодического СУ с резонансным контуром 100 Гц

Коэффициент сглаживания n -й гармоники выпрямленного напряжения и сопротивление последовательной части определяются по формулам (4) и (7) соответственно.

Сопротивление параллельной части для данного СУ определяется по формуле:

$$Z_{\text{пар}(n)} = \left[\left(R_1 + j \left(\omega_{(n)} \cdot L_1 - \frac{1}{\omega_{(n)} \cdot C_1} \right) \right)^{-1} + \left(R_C - j \frac{1}{\omega_{(n)} \cdot C_2} \right)^{-1} \right]^{-1}. \quad (14)$$

Схема однозвенного апериодического СУ приведена на рисунке 5.

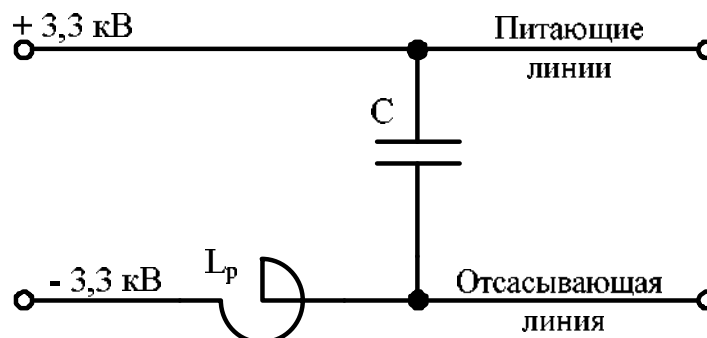


Рисунок 5 – Схема однозвенного апериодического СУ

Коэффициенты сглаживания n -й гармоники выпрямленного напряжения и сопротивления последовательной и параллельной частей для данного СУ определяются по формулам (4), (7) и (11) соответственно.

Для выполнения требований по обеспечению электромагнитной совместимости, требований к минимальным потерям электроэнергии и минимальной стоимости жизненного цикла необходимо выбрать наиболее простую схему – схему однозвенного апериодического СУ, а

к более сложным переходить только в случае, если простая схема не удовлетворяет по каким-либо количественным критериям выбора. При этом для снижения потерь электроэнергии в качестве реактора СУ может быть использовано токоограничивающее устройство на основе высокотемпературной сверхпроводимости [10].

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Необходимость разработки нового стандарта, позволяющего учесть современные условия эксплуатации СУ, обусловлена кардинальными изменениями, произошедшими за 50 лет после утверждения Правил... [8] в устройствах связи, СЦБ и тягового электроснабжения.

2. К нормативным основам стандарта по выбору схем и основных параметров СУ тяговых подстанций постоянного тока следует отнести требования, предъявляемые к СУ, в том числе общие требования, требования по обеспечению электромагнитной совместимости и обеспечению охраны труда, показатели эффективности и схемы СУ.

3. К основным показателям, характеризующим эффективность СУ, относятся результирующий коэффициент сглаживания и коэффициент сглаживания гармоники n -го порядка. Для выполнения требований к минимальным потерям электроэнергии и минимальной стоимости жизненного цикла необходимо выбирать наиболее простую схему СУ, а к более сложным переходить только в случае, если простая схема не удовлетворяет по каким-либо количественным критериям выбора.

4. Для обеспечения выполнения требований по электромагнитной совместимости в современных условиях эксплуатации в зависимости от схемы статического выпрямительного преобразователя, типа рельсовых цепей и проводных линий железнодорожной электросвязи на прилегающих межподстанционных зонах, значений коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения и значения коэффициента гармонической составляющей напряжения возможно использование двухзвенного резонансно-апериодического СУ Западно-Сибирской железной дороги, двухзвенного резонансно-апериодического СУ ВНИИЖТа, однозвенного резонансно-апериодического СУ с резонансным контуром 100 Гц, однозвенного апериодического СУ.

5. Обобщенная методика выбора схем и параметров СУ, приведенная в статье, учитывающая многолетний опыт эксплуатации и кардинальные изменения, произошедшие за 50 лет в устройствах связи, СЦБ и тягового электроснабжения, должна быть использована как базис для разработки стандарта по выбору схем и основных параметров сглаживающих устройств железнодорожных тяговых подстанций постоянного тока.

6. Требования национального стандарта по выбору схем и основных параметров СУ не должны ограничивать применение альтернативных инновационных технических решений, обеспечивающих выполнение заданных в стандарте требований, например, вместо реактора СУ может применяться токоограничивающее устройство на основе высокотемпературной сверхпроводимости.

Список литературы

1. Каштанов, А. Л. Актуализация энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, А. А. Комяков. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2015. – С. 141 – 147.

2. Никифоров, М. М. Целевые показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения и электропотребления на нетяговые нужды / М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2010. – № 3 (3). – С. 110 – 116.

3. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров. – Текст :

непосредственный // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч.-практ. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2012. – С. 9 – 15.

4. Черемисин, В. Т. Оценка потенциала повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2013. – № 2 (14). – С. 75 – 84.

5. Скоков, Р. Б. Анализ эффективности способов снижения потерь электрической энергии в реакторах сглаживающих устройств / Р. Б. Скоков, И. А. Кремлев, И. В. Тарабин. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2019. – № 4. – С. 75 – 79.

6. Скоков, Р. Б. Сглаживающие фильтры тяговых подстанций постоянного тока, адаптированные к современным видам связи и автоблокировки / Р. Б. Скоков, И. А. Кремлев, Н. А. Болдырев, И. В. Тарабин. – Текст : непосредственный // Энергоэффективность : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – С. 165 – 167.

7. Комякова, Т. В. Сглаживающие устройства тяговых подстанций постоянного тока с пониженным активным сопротивлением в последовательной цепи, адаптированные к современным видам связи и автоблокировки / Т. В. Комякова, Р. Б. Скоков, В. А. Квашук, В. А. Чернорай. – Текст : непосредственный // Электроснабжение железных дорог : межвуз. тематический сборник научных трудов. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – С. 22 – 26.

8. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрических железных дорог постоянного тока. – Москва : Транспорт, 1969. – 44 с. – Текст : непосредственный.

9. Магай, Г. С. Сглаживающие фильтры тяговых подстанций на участках с рельсовыми цепями тональной частоты / Г. С. Магай, Т. В. Комякова, Р. Б. Скоков; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2003. – 24 с. – Деп. во ВНИИАС МПС (ОИТЭИ ж.-д. трансп. (ЦНИИТЭИ) 30.05.2003, № 6409-жд2003. – Текст : непосредственный.

10. Применение токоограничивающего устройства на основе высокотемпературной сверхпроводимости для тяговых подстанций постоянного тока / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, Д. А. Горбунова, М. Г. Медовик. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2019. – № 3 (62). – С. 74 – 79.

References

1. Kashtanov A. L., Nikiforov M. M., Komyakov A. A. Actualization of the energy strategy of the JSC «Russian railways» [Aktualizatsiya energeticheskoy strategii kholdinga «Rossiyskiye zheleznyye dorogi»]. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchnoi konferentsii* (Innovative projects and technologies in education, industry and transport: materials of the scientific conference). – Omsk, 2015, pp. 141 – 147.

2. Nikiforov M. M. Target indicators of power savings and increase of power system effectiveness of the traction electrical supply and power consumption for not traction needs [Celevye pokazateli jenergosberezhenija i povyshenija jenergeticheskoy jeffektivnosti sistemy tjagovogo jelektrosnabzhenija i jelektropotreblenija na netjagovye nuzhdy]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2010, no. 3 (3), pp. 110 – 116.

3. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M. Increasing the energy efficiency of the traction power supply system and electric rolling stock [Povysheniye energeticheskoy effektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya i elektropodvizhnogo sostava]. *Innovatsionnye proekty i novye tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte : materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Innovative projects and new technologies in education, industry and transport: materials of the scientific and practical conference). – Omsk, 2012, pp. 9 – 15.

4. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M. Evaluation of the potential for improving the energy efficiency of the traction power supply system [Otsenka potentsiala povysheniya energeticheskoy

effektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 2 (14), pp. 75 – 84.

5. Skokov R. B., Kremlev I. A., Tarabin I. V. Analysis of the effectiveness of methods for reducing electrical energy losses in reactors of smoothing devices [Analiz effektivnosti sposobov snizheniia poter' elektricheskoi energii v reaktorakh sglazhivaiushchikh ustroystv]. *Transport Urala – Transport Of The Urals*, 2019, no. 4, pp. 75 – 79.

6. Skokov R. B., Kremlev I. A., Boldyrev N. A., Tarabin I. V. Smoothing filters of DC traction substations adapted to modern types of communication and auto-blocking [Sglazhivaiushchie fil'try tiagovykh podstantsii postoiannogo toka, adaptirovannye k sovremennym vidam svyazi i avtoblokirovki]. *Energy Efficiency: materials of the international scientific and practical conference* (Energy efficiency: Materials of the international scientific and practical conference). – Omsk, 2010, pp. 165 – 167.

7. Komyakova T. V., Skokov R. B., Kvashchuk V. A., Chernoray V. A. Smoothing devices of DC traction substations with reduced active resistance in a serial circuit, adapted to modern types of communication and auto-blocking [Sglazhivaiushchie ustroystva tiagovykh podstantsii postoiannogo toka s ponizhennym aktivnym soprotivleniem v posledovatel'noi tsepi, adaptirovannye k sovremennym vidam svyazi i avtoblokirovki]. *Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog : mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov* (Electric power supply of railways : interuniversity thematic collection of scientific works). – Omsk, 2016, pp. 22 – 26.

8. *Pravila zashchity ustroystv provodnoi svyazi i provodnogo veshchaniia ot vliianiia tiagovoi seti elektricheskikh zheleznykh dorog postoiannogo toka* (Rules for protecting wired communication devices and wired broadcasting from the influence of the traction network of DC electric railways). Moscow: Transport Publ., 1969, 44 p.

9. Magay G. S., Komyakova T. V., Skokov R. B. *Sglazhivaiushchie fil'try tiagovykh podstantsii na uchastkakh s rel'sovymi tsepiami tonal'noi chastoty* (Smoothing filters of traction substations on sections with tonal frequency rail circuits). Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2003, deposited in VNIAS MPS (OITEI zh.-d. transp. (TSNIITEI)) 30.05.2003, no. 6409-zhd2003, 24 p.

10. Kashtanov A. L., Nikiforov M. M., Gorbunova D. A., Medovik M. G. Application of superconducting fault current limiters for the traction substations of DC-current [Primeneniye tokoogranichivayushchego ustroystva na osnove vysokotemperaturnoy sverkhprovodimosti dlya tiagovykh podstantsiy postoyannogo toka]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2019, no. 3 (62), pp. 74 – 79.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Скоков Руслан Борисович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

Тел.: (381-2) 44-39-23.

E-mail: skokovrb@yandex.ru

Никифоров Михаил Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заместитель директора Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте Омского государственного университета путей сообщения.

Тел.: (381-2) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Skokov Ruslan Borisovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, K. Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D. in Engineering, Assistant Professor of the Department «Railroad power supply».

Phone: (3812) 31-34-46.

E-mail: skokovrb@yandex.ru

Nikiforov Mikhail Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av. Omsk, 644046 Russia.

Ph. D. in Engineering, deputy director of Research Institute for Energy Efficiency in Railway Transport of Omsk State Transport University.

Phone: (381-2) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

Кондратьев Юрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

Тел.: (381-2) 44-39-23.

E-mail: juvk.omgups.egt@mail.ru

Kondratyev Yuri Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, K. Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D. in Engineering, Assistant Professor of the Department «Railroad power supply».

Phone: (3812) 31-34-46.

E-mail: juvk.omgups.egt@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Скоков, Р. Б. Нормативные основы стандарта по выбору схем и основных параметров сглаживающих устройств железнодорожных тяговых подстанций постоянного тока / Р. Б. Скоков, М. М. Никифоров, Ю. В. Кондратьев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3(43). – С. 27 – 39.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Skokov R. B., Nikifirov M. M., Kondratyev Yu. V. Regulatory framework of the standard for the selection of schemes and basic parameters of the smoothing devices of railroad traction DC substations. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 3 (43), pp. 27 – 39 (In Russian).

УДК 621.311:621.331

А. С. Вильгельм

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ПЛАНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГИ ПОЕЗДОВ

Аннотация. В статье освещены темы энергоэффективности тяги поездов в ОАО «РЖД». Обоснована актуальность научных исследований в данном вопросе. Приведены требования к организационно-техническим мероприятиям, внедряемым с целью повышения энергоэффективности тяги поездов. Определены группы факторов, фактически влияющих на показатели энергоэффективности. Предложено создание интеллектуальной системы мониторинга и планирования энергоэффективности тяги поездов. Сформулированы цели и задачи создания такой системы. Описаны основные особенности и классы интеллектуальных систем в контексте их применения для решения обозначенных в статье задач. Приведены функциональная схема предлагаемой системы и ее описание.

Ключевые слова: энергоэффективность, тяга поездов, система тягового электроснабжения, электроподвижной состав, интеллектуальные системы, анализ данных, имитационное моделирование.

Alexander S. Vilgelm

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

APPLICATION OF INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES FOR MONITORING AND PLANNING OF THE TRAINS TRACTION ENERGY EFFICIENCY

Abstract. This article touches upon the energy efficiency of train traction at Russian Railways. The relevance of scientific research in this issue has been substantiated. Requirements for organizational and technical measures implemented to improve the energy efficiency of train traction are given. The groups of factors that actually affect energy efficiency indicators have been identified. The creation of an intelligent system for monitoring and planning energy efficiency of train traction is proposed. The goals and objectives of creating such a system are formulated. The main features and classes of intelligent systems in the context of their application for solving the problems indicated in the article are described. The functional diagram of the proposed system and its description are given.

Keywords: energy efficiency, train traction, traction power supply system, electric rolling stock, intelligent systems, data mining, simulation.

Вопросы энергосбережения в тяговом электроснабжении российских железных дорог актуальны и значимы. Так, например, в 2019 г. расходы компании ОАО «РЖД» на приобретение электроэнергии на тягу поездов составили более 155 млрд руб. Также стоит отметить рост этих расходов за предыдущие пять лет, который составлял в среднем 8,0 % в год.

Вместе с тем ежегодно продолжается внедрение мероприятий, направленных на повышение уровня энергоэффективности перевозочного процесса.

В такой сложной структуре, как система тягового электроснабжения (СТЭ), взаимодействующая с электроподвижным составом (ЭПС), а тем более с учетом применения ЭПС рекуперативного торможения [1 – 3], анализ и планирование энергоэффективности должны сопровождаться комплексной оценкой эффективности предлагаемых к внедрению мероприятий. Технические и организационные мероприятия, внедряемые с этой целью, должны отвечать следующим требованиям:

- обеспечивать снижение уровня энергоемкости перевозочного процесса;
- быть экономически целесообразными;
- способствовать обеспечению перевозочного процесса в требуемых действующих и перспективных объемах.

В настоящее время не существует методик или программных средств, позволяющих оценить и спрогнозировать изменение показателей энергоэффективности тяги поездов относительно текущих значений при изменении технических характеристик СТЭ и эксплуатационных параметров участков железных дорог. В данном вопросе интересным представляется создание интеллектуальной системы (ИС) мониторинга и планирования показателей энергоэффективности тяги поездов (далее – ИС МПЭТ), основанной на знаниях о степени влияния на основные показатели энергоэффективности факторов, которые условно можно отнести к трем группам:

- эксплуатационные факторы и характеристики, обусловленные системой организации движения поездов;
- эксплуатационные факторы и характеристики, обусловленные системой организации управления тяговыми ресурсами;
- параметры и характеристики СТЭ.

Одна из основных функций, которые должна выполнять ИС МПЭТ, – это определение оптимального сочетания названных выше факторов и характеристик, что позволило бы повысить обоснованность планирования изменений характеристик СТЭ и улучшения организации тяги поездов с точки зрения достижения максимально возможной энергоэффективности. Общая архитектура такой системы приведена в работе [4]. Задачи, решение которых позволит практически реализовать и внедрить в эксплуатацию подобную разработку, являются интеллектуальными, и их решение подразумевает использование технологий искусственного интеллекта (ИИ), а сама система ИС МПЭТ должна стать в полной мере интеллектуальной, а не только аналитической или статистической.

Отличительной чертой ИС от аналитических и статистических систем является способность

- к обработке динамичных данных, изменяющихся в процессе обработки;
- к изменению самих методов обработки данных по мере поступления данных и обновления;
- к самообучению, т. е. возможность получения знаний из уже накопленных опыта и данных.

При программной реализации ИС вместо точных алгоритмов, как правило, используется метод эвристического поиска решения, который в отличие от алгоритмов полного перебора позволяет ранжировать состояния объекта исследования на основе их «перспективности». Основным классом алгоритмов эвристического поиска является поиск от оптимального состояния.

Одним из главных направлений развития ИИ является разработка ИС, основанных на знаниях [5 – 8]. Знаниями о закономерностях распределения потоков энергии в СТЭ могут являться специально разработанные алгоритмы и эмпирические выражения, полученные различными путями и описывающие взаимосвязь необходимых для анализа значений показателей энергоэффективности СТЭ и значений влияющих факторов, характеристик и параметров, характеризующих работу участков железных дорог.

К основным классам ИС [9], необходимым для реализации с целью выполнения функций мониторинга и планирования энергоэффективности тяги поездов, можно отнести:

1) системы с интеллектуальным интерфейсом [5, 6];

2) экспертные системы;

3) системы выявления данных из опыта (эмпирических фактов) и интеллектуального анализа данных.

Рассмотрим, как именно указанные классы ИС могут быть использованы при практической реализации предлагаемой ИС МПЭТ. Для этого рассмотрим функциональную схему данной системы (рисунок). Система ИС МПЭТ должна реализовывать три основные группы интеллектуальных задач:

1) формирование базы данных исходной отчетной и расчетной информации;

2) интеллектуальный анализ данных (ИАД) и получение расчетных выражений;

3) экспертную поддержку принятия решений.

Первая задача может решаться за счет применения систем с интеллектуальным интерфейсом как интеллектуальных баз данных, которые позволят обеспечить выборку необходимой исходной для работы системы информации, выводимой из совокупности хранимых в ИВЦ ОАО «РЖД» отчетных данных.

В качестве инструмента ИАДа (вторая задача) может быть использована технология Data Mining, которая способна обеспечить постоянную актуализацию функциональных и логических закономерностей в выборках накопленной информации о состоянии энергоэффективности тяги поездов с учетом значений влияющих факторов, параметров и характеристик, а также обеспечить и прогнозирование развития изучаемых процессов энергопотребления в СТЭ. Предполагается, что процесс интеллектуальной деятельности Data Mining в предлагаемой системе ИС МПЭТ будет включать в себя несколько стадий:

– выявление трендов, т. е. устойчивых закономерностей, ассоциаций и последовательностей;

– прогностическое моделирование, т. е. предсказание неизвестных значений и прогнозирование развития процессов;

– анализ исключений, определяющий отклонения и объясняющий их.

Математической основой систем Data Mining могут стать методы поиска различных закономерностей в данных, таких как деревья решений, алгоритмы кластеризации, регрессионный анализ, нейронные сети, временные ряды и др. [10].

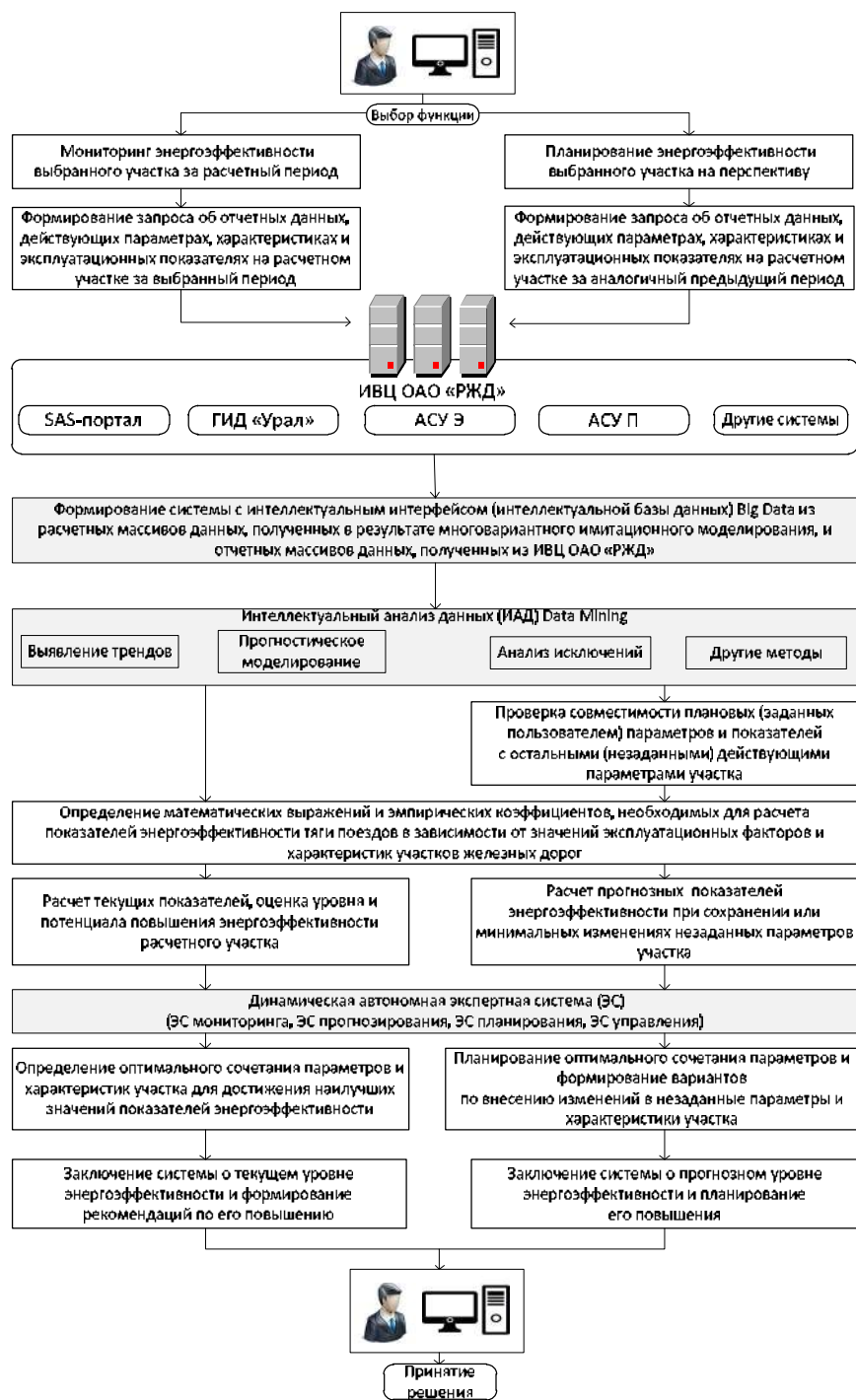
Программной же реализацией системы Data Mining могут стать статистические пакеты, с помощью которых будет решаться круг задач по созданию корреляционных моделей, факторному анализу, регрессионному анализу и др., например, такие мощные статистические пакеты, как SAS (компания SAS Institute), SPSS (SPSS), Statistica и др. Стоит отметить, что ядром корпоративного информационного хранилища (КИХа) ОАО «РЖД», которое, по сути, является банком основных показателей работы железных дорог, является как раз программное обеспечение компании SAS.

Решение третьей интеллектуальной задачи – выполнение роли ассистента при анализе различных вариантов принятия решения по повышению энергоэффективности тяги поездов в конкретных условиях – в данном случае может осуществлять специально разработанная экспертная система (ЭС). Поскольку алгоритмическое решение поиска оптимального варианта из многообразия вариантов сочетания совокупности факторов, характеристик и параметров, позволяющих обеспечить наилучшие показатели энергоэффективности, существует, но про-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

блематично в практическом применении ввиду огромной размерности пространства решений, оптимальным инструментом в данном случае является именно применение ЭС.

Таким образом, очевидно, что внутри предлагаемой системы ИС МПЭТ должны функционировать и взаимодействовать несколько ИС, имитационные модели, системы поддержки принятия решений, системы ИИ и др. Только в этом случае станет возможным образование интегрированных комплексов поддержки принятия оптимальных решений, необходимых для исполнения обозначенных функций мониторинга и планирования энергоэффективности тяги поездов. Причем это актуально в интересах как достижения перспектив (стратегических целей), так и своевременного и адекватного реагирования на изменения внешних условий (факторов) в процессе управления организацией движения поездов и работой СТЭ.



Функциональная схема ИСМПЭТ

Согласно функциональной схеме предлагаемой системы (см. рисунок) функция мониторинга энергоэффективности решается по левой ветви алгоритма в несколько этапов:

1) пользователь ИС МПЭТ выбирает необходимый для анализа участок и период расчета;

2) ИС МПЭТ формирует запрос необходимых для расчета отчетных данных за расчетный период на серверы информационных вычислительных центров (ИВЦ) ОАО «РЖД»;

3) необходимые для расчета данные за расчетный период из соответствующих электронных отчетных форм, хранящихся в ИВЦ, загружаются в ИС МПЭТ;

4) ИС МПЭТ формирует базу данных, выполняет ИАД, формирует математические выражения и эмпирические коэффициенты и выполняет расчет текущих значений показателей за выбранный период, оценивает уровень энергоэффективности относительно потенциала при текущих условиях;

5) ИС МПЭТ на основе работы ЭС определяет перечень изменений параметров и характеристик участка для улучшения показателей и достижения расчетного уровня энергоэффективности;

6) пользователю ИС МПЭТ выводится информация о текущем уровне энергоэффективности, потенциале его повышения, а также рекомендации и предложения для достижения потенциала с оценкой прогнозных изменений показателей энергоэффективности;

7) пользователь ИС МПЭТ принимает решение по оптимизации энергообеспечения тяги поездов на участке при существующем уровне показателей перевозочного процесса (размерах движения, весовых нормах, скоростях движения поездов и др.).

Вторая функция – это планирование энергоэффективности выбранного участка на перспективу с учетом планов по улучшению показателей перевозочного процесса и проектных (перспективных) изменений в параметрах участка, а также с определением перечня неприкосновенных или нежелательных к изменению параметров участка. Решается эта задача по правой ветви алгоритма (см. рисунок) в следующей последовательности:

1) пользователь ИС МПЭТ выбирает необходимый для анализа участок, период планирования, задает плановые показатели перевозочного процесса, указывает проектные изменения в параметрах участка (при их наличии) и отмечает неприкосновенные (или нежелательные) к изменению параметры участка;

2) ИС МПЭТ формирует запрос необходимых для расчета отчетных данных за аналогичный перспективному предыдущий период на серверы информационных вычислительных центров ОАО «РЖД»;

3) необходимые для расчета данные за предыдущий период из соответствующих электронных отчетных форм, хранящихся в ИВЦ, загружаются в ИС МПЭТ;

4) ИС МПЭТ формирует базу данных, выполняет ИАД, формирует математические выражения и эмпирические коэффициенты и выполняет проверку совместимости плановых (заданных пользователем) параметров и показателей с остальными (незаданными) действующими параметрами участка;

5) ИС МПЭТ выполняет расчет плановых показателей энергоэффективности при сохранении или минимальных изменениях не заданных пользователем параметров участка;

6) ИС МПЭТ на основе работы выполняет подбор оптимального сочетания параметров и формирование вариантов по внесению изменений в не заданные пользователем параметры и характеристики участка;

7) пользователю ИС МПЭТ выводится информация о прогнозном уровне энергоэффективности и рекомендации по его повышению;

8) пользователь ИС МПЭТ принимает решение по оптимизации энергообеспечения тяги поездов на участке для перспективного уровня показателей перевозочного процесса.

В обоих вариантах выбора пользователь ИС МПЭТ самостоятельно принимает решение по оптимизации энергообеспечения тяги поездов на участке при существующем или перс-

пективном уровне показателей перевозочного процесса, ориентируясь на рекомендации интеллектуальной системы, по сути, оказывающей ему поддержку.

Целью создания ИС МПЭТ является повышение эффективности эксплуатации СТЭ и ЭПС железных дорог. Это планируется достичь за счет интеллектуализации процессов мониторинга показателей энергоэффективности и процессов определения оптимального сочетания факторов, влияющих на энергоэффективность, параметров и характеристик участка для обоснованного планирования изменений характеристик СТЭ, системы организации движения поездов, системы управления тяговыми ресурсами при планировании улучшения эксплуатационных показателей участков с учетом минимизации энергоемкости перевозочного процесса.

Для достижения обозначенной цели необходимо решение совокупности задач, к основным из которых можно отнести следующие.

1) Создание имитационных моделей электрифицированных участков железных дорог для моделирования работы СТЭ и расчетов показателей энергоэффективности тяги поездов.

2) Проведение многовариантного имитационного моделирования на основании созданных имитационных моделей с целью получения расчетных выборок данных о зависимостях показателей энергоэффективности тяги поездов от совокупности влияющих факторов на разнотипных участках железных дорог (получение расчетных «базовых» выборок данных).

3) Анализ данных расчетных «базовых» выборок методом регрессионного анализа.

4) Определение эмпирических коэффициентов и получение математических выражений, необходимых для расчета показателей энергоэффективности тяги поездов в зависимости от значений эксплуатационных факторов и характеристик участков железных дорог.

5) Разработка методики автоматизированного определения и анализа показателей энергоэффективности тяги поездов на основании фактических отчетных значений эксплуатационных факторов и характеристик расчетных участков, получаемых из информационно-аналитических систем ОАО «РЖД», по эмпирическим математическим выражениям, разработанным при решении задачи 4.

6) Разработка алгоритма совершенствования математических выражений для расчета показателей энергоэффективности тяги поездов на основании актуализации расчетных выборок за счет их синтеза с выборками отчетной информации, получаемой в процессе эксплуатации рассматриваемого участка. Здесь предполагается осуществление следующих действий:

формирование «рабочей» выборки из отчетных эксплуатационных данных и ее обработка;

проверка адекватности эмпирических коэффициентов и математических выражений, полученных при обработке расчетной «базовой» выборки;

проверка однородности и объединение расчетной «базовой» выборки и «рабочей» отчетной выборки;

получение эмпирических коэффициентов и математических выражений, пригодных для расчета показателей энергоэффективности тяги поездов в действующих условиях.

В статье [11] описан интеллектуальный анализ данных для выявления закономерностей влияния различных факторов на энергоэффективность электропоездов. Одним из отличий предлагаемого метода является то, что «рабочая» выборка в процессе функционирования ИС МПЭТ на участке будет постоянно дополняться новыми данными с целью постоянной актуализации обобщенной выборки.

После решения обозначенных задач, направленных в первую очередь на организацию мониторинга показателей энергоэффективности, для реализации возможностей планирования энергоэффективности тяги поездов потребуется разработка алгоритма определения оптимального сочетания значений эксплуатационных факторов и характеристик участка для дальнейшего обоснованного планирования их изменений.

Для решения данной задачи предполагается адаптация «теории графов». А именно применение модели лабиринтного поиска, при которой задача представляется как некоторое пространство состояний в форме графа, в котором проводится поиск оптимального пути от

входных данных к результирующим. Так, все значения эксплуатационных факторов и характеристик участка с определенной дискретностью могут быть представлены как вершины множества графов, ребра каждого из которых образуют связи факторов и характеристик, реализуемых для заданных расчетных условий, а сами графы показывают все возможные варианты сочетания факторов и характеристик на расчетном участке. Их число соответствует количеству возможных вариантов сочетания эксплуатационных факторов и характеристик. Задача поиска оптимального решения в этом случае будет сведена к эвристическому поиску возможных наилучших значений показателей энергоэффективности на основе программной реализации ЭС внутри ИС МПЭТ.

Подводя итог описанному в статье, стоит отметить, что для реализации предлагаемой ИС МПЭТ, безусловно, потребуется большое количество сложных и наукоемких работ. Однако в результате этих работ, направленных на решение обозначенных в статье задач, удастся получить необходимую совокупность знаний для создания ядра сложной информационно-аналитической интеллектуальной системы, которая в процессе своего функционирования будет способна решать сложнейшие задачи по повышению уровня энергоэффективности тяги поездов и, как следствие, по повышению экономической эффективности деятельности ОАО «РЖД».

Список литературы

1. Черемисин, В. Т. Основные положения методики оценки эффективности использования энергии рекуперации / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1 (65). – С. 114 – 120.
2. Черемисин, В. Т. Методика оценки использования энергии рекуперации / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2018. – № 1 (74). – С. 34 – 45.
3. Черемисин, В. Т. Эффективность использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного и переменного тока: научная монография / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – 216 с. – Текст : непосредственный.
4. Cheremisin V. T., Vilgelm A. S. Intellectual monitoring and planning system of energy efficiency indices of the traction power supply system, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 918 (2020) 012092 VIII International Scientific Conference Transport of Siberia, 2020*, DOI:10.1088/1757-899X/918/1/012092.
5. Тельнов, Ю. Ф. Интеллектуальные информационные системы : учебное пособие / Ю. Ф. Тельнов. – Москва: Московский междунар. ин-т эконометрики, информатики, финансов и права, 2002. – 118 с. – Текст : непосредственный.
6. Интеллектуальные информационные системы и технологии : учебное пособие / Ю. Ю. Громов, О. Г. Иванова, В. В. Алексеев [и др.]. – Тамбов : Тамбовский гос. техн. ун-т, 2013. – 244 с. – Текст : непосредственный.
7. Дюк, В. Data Mining : учебный курс / В. Дюк, А. Самойленко. – Санкт-Петербург : Питер, 2001. – 366 с. – Текст : непосредственный.
8. Статические и динамические экспертные системы / Э. В. Попов, И. Б. Фоминых, Е. Б. Кисель [и др.]. – Москва : Финансы и статистика, 1997. – 310 с. – Текст : непосредственный.
9. Луценко, Е. В. Интеллектуальные информационные системы : учебное пособие / Е. В. Луценко. – Краснодар : Кубанский гос. аграрный ун-т, 2013. – 645 с. – Текст : непосредственный.
10. Барсегян, А. А. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP : учебное пособие / А. А. Барсегян. – Санкт-Петербург : БХВ Петербург, 2007. – 376 с. – Текст : непосредственный.

11. Ren J., Zhang Q., Liu F. Analysis of Factors Affecting Traction Energy Consumption of Electric Multiple Unit Trains Based on Data Mining, *Journal of Cleaner Production*, vol. 262, 20 July 2020, 121374, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121374.

References

1. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. The main provisions of the methodology for assessing the efficiency of the use of recuperation energy [Osnovnyye polozheniya metodiki otsenki effektivnosti ispol'zovaniya energii rekuperatsii]. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya – Bulletin of Rostov State Transport University*, 2017, no. 1 (65), pp. 114 – 120.
2. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Methodology for assessing the use of recuperation energy [Metodika otsenki ispol'zovaniya energii rekuperatsii]. *Mir Transporta – World of Transport and Transportation*, 2018, no. 1 (74), pp. 34 – 45.
3. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. *Effektivnost' ispol'zovaniya energii rekuperatsii na zhelez-nykh dorogakh postoyannogo i peremennogo toka: monografiya* (Efficiency of using recuperative energy on DC and AC railways: monograph). Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2018, 216 p.
4. Cheremisin V. T., Vilgelm A. S. Intellectual monitoring and planning system of energy efficiency indices of the traction power supply system, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 918 (2020) 012092 VIII International Scientific Conference Transport of Siberia*, 2020, DOI:10.1088/1757-899X/918/1/012092.
5. Telnov Y. F. *Intellektual'nyye informatsionnyye sistemy* (Intelligent information systems). Moscow: Moscow International Institute of Econometrics, Informatics, Finance and Law, 2002, 118 p.
6. Gromov Y. Y., Ivanova O. G., Alekseev V. V. and others. *Intellektual'nyye informatsionnyye sistemy i tekhnologii* (Intelligent information systems and technologies). Tambov: Publishing house of TSTU, 2013, 244 p.
7. Duke V., Samoilenko A. *Data Mining: uchebnyy kurs* (Data Mining: training course). St. Petersburg: Peter Publ., 2001, 366 p.
8. Popov E. V., Fominykh I. B., Kisel E. B. and others. *Staticheskiye i dinamicheskiye ekspertnyye sistemy* (Static and dynamic expert systems). Moscow: Finance and Statistics, 1997, 310 p.
9. Lutsenko E. V. *Intellektual'nyye informatsionnyye sistemy: uchebnoye posobiye dlya studentov spetsial'nosti 230400 «Informatsionnyye sistemy i tekhnologii»* (Intelligent information systems: a textbook for students of the specialty 230400 «Information systems and technologies»). Krasnodar: Kuban State Agrarian University Publ., 2013, 645 p.
10. Barsegyan A. A. *Tekhnologii analiza dannykh: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP: uchebnoye posobiye dlya spetsial'nosti «Informatsionnyye sistemy»* (Data analysis technologies: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP: a textbook for the specialty «Information Systems»). Saint Petersburg: BHV Petersburg, 2007, 376 p.
11. Ren J., Zhang Q., Liu F. Analysis of Factors Affecting Traction Energy Consumption of Electric Multiple Unit Trains Based on Data Mining, *Journal of Cleaner Production*, vol. 262, 20 July 2020, 121374, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121374.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Вильгельм Александр Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», доцент.

Тел.: +7-983-528-93-74.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vilgelm Alexander Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, K. Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D. in Engineering, Assistant Professor of the Department «Rolling stock of electric railways».

Phone: +7-983-528-93-74.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Вильгельм, А. С. Применение интеллектуальных систем и технологий для мониторинга и планирования энергоэффективности тяги поездов / А. С. Вильгельм. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 39 – 47.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Vilgelm A. S. Application of intelligent systems and technologies for monitoring and planning of the trains traction energy efficiency. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 3 (43), pp. 39 – 47 (In Russian).

УДК 629.423.1

А. Г. Андриевский¹, В. В. Москвичев², Е. А. Чабан¹

¹Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КРИЖТ, ИрГУПС), г. Красноярск, Российская Федерация;

²Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Красноярский филиал, г. Красноярск, Российская Федерация

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЖУХА ТЯГОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОВОЗА

Аннотация. Для колесно-моторного блока грузовых электровозов характерно динамическое воздействие широкого спектра возмущений, связанных с неровностями пути. Данное обстоятельство является одной из основных причин высокой повреждаемости кожухов зубчатой передачи, отмечаемой в последнее время, и свидетельствует о необходимости совершенствования его конструкции. Предлагаемые конструктивные изменения для кожуха должны быть непосредственно связаны с оценкой уровня динамической нагруженности в процессе его эксплуатации. Представлены результаты численного и экспериментального определения собственных частот металлических кожухов тяговой зубчатой передачи, использующихся на электровозах серий ВЛ85 и 2(3)ЭС5К. Для численного определения собственных частот кожухов выполнен модальный расчет твердотельной модели кожуха в программной среде Ansys Workbench с применением метода конечных элементов. Проведен сравнительный анализ распределения полей деформаций в боковинах кожуха для незакрепленного к тяговому двигателю и жестко закрепленного кожуха. Для экспериментальной оценки собственных частот кожухов зубчатой передачи использовался вибропреобразователь, закрепленный на кожухе, для возбуждения вибрации применен метод возбуждения колебаний одиночным ударом. В результате проведения эксперимента на некоторых частотах были выявлены пиковые значения виброускорения, что свидетельствует о возникающих резонансных явлениях для кожуха, и получены значения таких динамических параметров для конструкции кожуха, как собственная частота, добротность колебательной системы, логарифмический декремент затухания, время релаксации. Значения собственных частот кожуха зубчатой передачи получены путем решения системы дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода. Созданная с этой целью математическая модель рассматриваемой механической системы учитывает упругий характер крепления кожуха к тяговому двигателю. Полученные таким образом значения частот собственных колебаний кожуха зубчатой передачи позволяют оценить его динамическую нагруженность при частотах, близких резонансным.

Ключевые слова: кожух зубчатой передачи, вибрация, собственные частоты, тяговый привод, колесно-моторный блок, тяговая передача.

Anatoliy G. Andrievskiy¹, Vladimir V. Moskvichev², Elena A. Chaban¹

¹Krasnoyarsk Institute of railway transport, branch of Irkutsk state University of railway communications, Krasnoyarsk, the Russian Federation;

²Institute of Computational Technologies SB RAS, Krasnoyarsk Branch Office, Krasnoyarsk, the Russian Federation

NUMERICAL-EXPERIMENTAL DETERMINATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE CASE OF THE DRIVE GEAR OF THE ELECTRIC LOCOMOTIVE

Abstract. The wheel-motor unit of freight electric locomotives is characterized by the dynamic effect of a wide range of the disturbances due to irregularities in the track. This is one of the main reasons for the high damageability of the gear casings, observed recently, and it indicates the need to improve its design. The proposed design changes for the casing should be directly related to the assessment of the level of the dynamic loading during its operation. The results of the numerical and experimental determination of the natural frequencies of metal casings of traction gear used

on electric locomotives of the VL85 and 2 (3) ES5K series are presented. For the numerical determination of the natural frequencies of the enclosures, a modal calculation of the solid model of the enclosure in the Ansys Workbench software environment was performed using the finite element method. A comparative analysis of the distribution of deformation fields in the sidewalls of the casing for a casing that is not fixed to the traction engine and rigidly fixed is carried out. For the experimental evaluation of the natural frequencies of the gear casings, a vibration transducer fixed on the casing was used; the method of excitation of vibrations with a single blow was used to excite vibration. As the result of the experiment, the peak values of vibration acceleration were revealed at some frequencies, which testifies to the emerging resonance phenomena for the casing, and the values of such dynamic parameters for the casing design as natural frequency, Q -factor of the oscillating system, logarithmic damping decrement, relaxation time were obtained. The values of the natural frequencies of the gear housing are obtained by solving a system of Lagrange differential equations of the second kind. The mathematical model of the considered mechanical system created for this purpose takes into account the elastic nature of the casing attachment to the traction motor. The values of the frequencies of the natural vibrations of the gear housing obtained make it possible to evaluate its dynamic loading at the frequencies close to the resonant ones.

Keywords: gear case, vibration, natural frequencies, traction drive, wheel-motor block, traction drive.

Выявляемые отказы механического оборудования локомотивов неизбежно связаны с действием эксплуатационных динамических нагрузок, которые в полной мере невозможно учесть с помощью коэффициента запаса прочности [1]. При этом для электровозов характерно динамическое воздействие широкого спектра возмущений, которые можно разделить на три вида: кинематические, динамические и параметрические [2]. Ввиду конструктивных особенностей наиболее высоконагруженными являются элементы опорно-осевого тягового привода электровозов. На некоторых частотах возмущения силы упругости, действующие на элементы привода, уравниваются силами их инерции, что приводит к возникновению динамических нагрузок в условиях резонанса. В этой ситуации чрезвычайно актуальной становится задача снижения динамической нагруженности элементов тягового привода с целью повышения его надежности. В настоящее время отмечается высокая повреждаемость кожухов зубчатой передачи (КЗП) по сравнению с другими элементами тягового привода грузовых электровозов Восточного полигона в зимне-весенний период времени [3, 4]. Выявляемые повреждения КЗП имеют, как правило, усталостный характер происхождения, что свидетельствует о высоконагруженных (предельнонагруженных) условиях его эксплуатации. Повышенное количество отказов КЗП электровозов Восточного полигона свидетельствует о необходимости совершенствования его конструкции. В связи с этим исследования динамических характеристик КЗП представляются практически значимой задачей. Кроме того, многие неисправности кожухов, как показывает опыт эксплуатации, возникают из-за ослабления болтов его крепления к тяговому двигателю, что является следствием повышенной вибрации. Задача рационального проектирования кожуха зубчатой передачи сводится не только к обеспечению его требуемой прочности и жесткости под действием эксплуатационных нагрузок, но и к достижению требуемых динамических свойств, снижающих его виброактивность.

Согласно принятой технологии производства каждая разъемная часть КЗП изготавливается как сварная корпусная конструкция из листовой низколегированной конструкционной стали марок СтЗсп, СтЗпс или 09Г2С. Крепление КЗП к тяговому двигателю предусмотрено со стороны боковины через три точки, расположенные в двух параллельных плоскостях, с помощью болтов, установленных с зазором.

КЗП не является несущей конструкцией, нагружен только собственным весом 145 кг и подвержен действию динамических и вибрационных нагрузок. Геометрические характеристики поперечных сечений КЗП – осевые моменты инерции I_x , I_y и моменты сопротивления сечения изгибу W_x , W_y – имеют переменное значение по его конструкции. Боковины обеспечивают высокую жесткость конструкции КЗП при изгибе в вертикальной плоскости и наименьшую жесткость в направлении поперечной оси пути. В данном направлении существенно снижают жесткость конструкции имеющиеся в боковинах отверстия под ось колесной пары и вал тягового двигателя, в связи с чем края контура этих отверстий, где расположены полукольца, имеют значительную амплитуду деформаций.

1. Расчетная оценка собственных частот КЗП. Динамические характеристики конструкции, а это прежде всего резонансные или собственные частоты и относительное демпфирование элемента на стадии проектирования изделия определяют путем расчета или по данным для аналогичных конструкций [5]. Значение расчетного максимального ускорения, действующего на элементы конструкции изделия, определяют исходя из низшей резонансной частоты и относительного демпфирования системы, содержащей указанные элементы конструкции. Собственные частоты колебательной системы проявляются в виде локальных максимумов на амплитудно-частотной характеристике осциллятора. Определение собственных частот и форм колебаний изделия выполнялось в рамках модального анализа методом конечных элементов (МКЭ) на соответствующей модели КЗП. Закрепление модели осуществлялось в точках крепления к тяговому двигателю. Отработка модели проведена на основе анализа вычисленных нормальных форм колебаний модели по уравнению [6]

$$([K] - \omega^2 [M]) \cdot \{\Phi\} = 0 \quad (1)$$

и расчета собственных частот по уравнению

$$([K] - \omega^2 [M]) = 0, \quad (2)$$

где $[K]$ – матрица коэффициентов жесткости элементов; $[M]$ – матрица масс элементов; ω^2 – матрица собственных частот; $\{\Phi\}$ – матрица собственных векторов элементов, соответствующих собственным частотам и формам колебаний.

Оценка собственных частот и форм конструкции позволяет сделать вывод о преимуществах и недостатках конструктивных решений для данного изделия. С целью проведения такой оценки для КЗП была разработана твердотельная модель и выполнен модальный расчет в программной среде *Ansys Workbench*. Предполагалось, что все элементы кожуха абсолютно жестко соединены между собой, а сам кожух жестко закреплен в точках крепления к тяговому двигателю. При этом наличие смазки в нижней половине КЗП не учитывалось, поскольку вес имеющейся жидкости по отношению к весу КЗП составляет порядка 3 – 5 %, что на результат проводимого исследования существенного качественного влияния не оказывает, а обмен энергией между плескающейся смазочной жидкостью и стенками кожуха несущественен. Проведенные расчеты позволили найти значения собственных частот модели КЗП (рисунок 1).

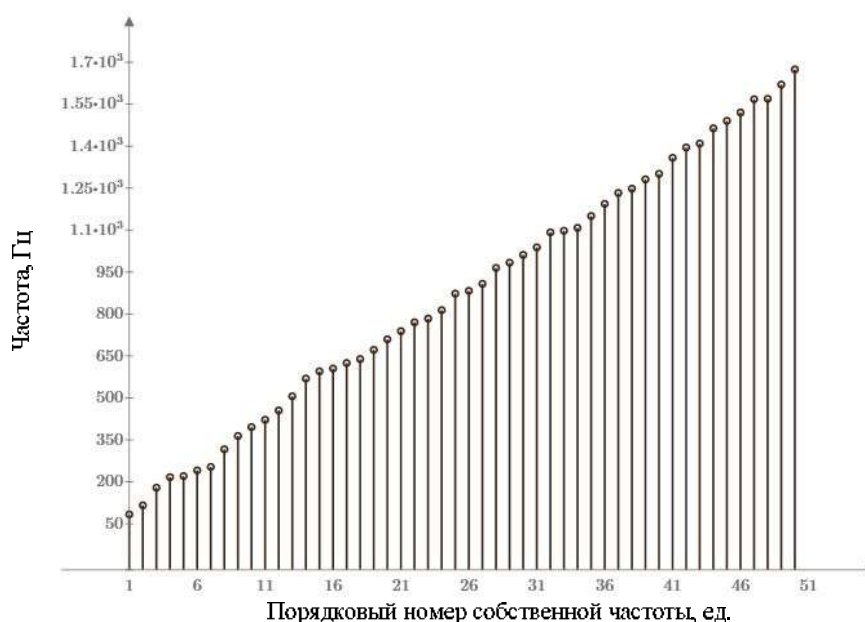


Рисунок 1 – Полоса спектра собственных частот КЗП

Первая собственная частота 83,54 Гц (см. рисунок 1) соответствует изгибным колебаниям боковин кожуха в горизонтальной плоскости (рисунок 2) ввиду малой жесткости кожуха в этом направлении. Согласно полученным в результате проведенного численного эксперимента изолиниям распределения деформаций (см. рисунок 2) часть кожуха между точками закрепления, конструктивно образующими треугольник, практически не имеет никаких перемещений. В направлении вдоль оси симметрии КЗП от центра тяжести кожуха к его крайним точкам значения перемещений увеличиваются. Левая часть КЗП более массивна, что также влияет на величину возникающих деформаций.

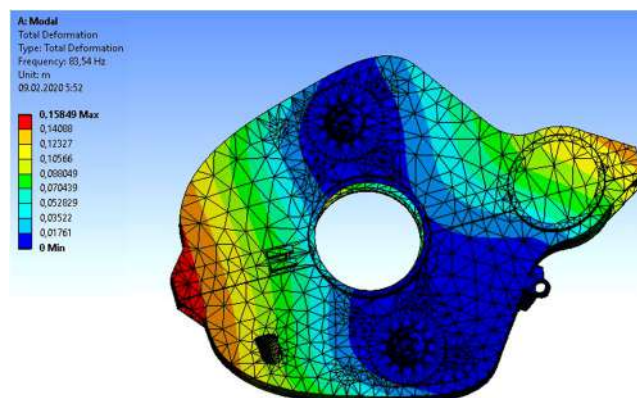


Рисунок 2 – Первая изгибная форма жестко закрепленного к тяговому двигателю КЗП электровоза ВЛ80^Р в горизонтальной плоскости

В случае проведения аналогичных расчетов для незакрепленного к тяговому двигателю КЗП собственные частоты снижаются по сравнению с жестко закрепленным кожухом (рисунок 3).

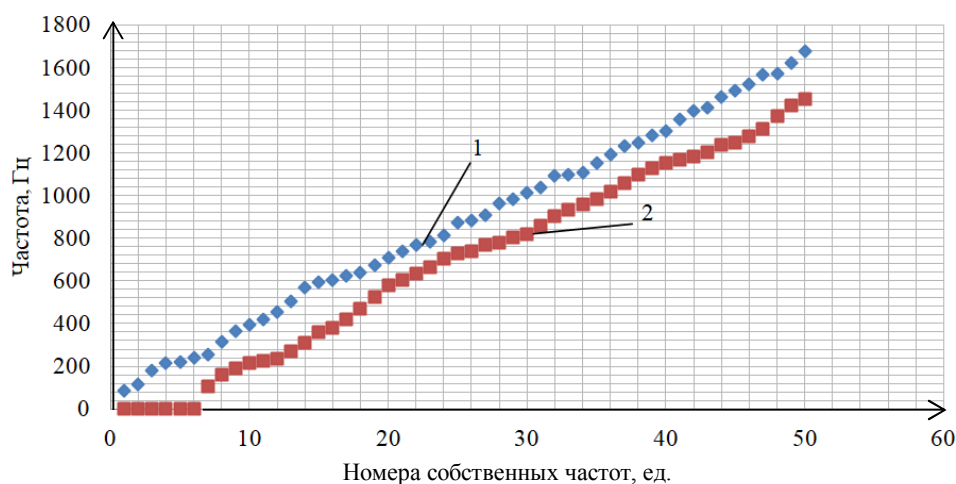


Рисунок 3 – Спектр собственных частот КЗП: 1 – жесткое закрепление; 2 – без закрепления

Согласно полученному спектру собственных частот (см. рисунок 3) для незакрепленного КЗП первые шесть собственных частот соответствуют колебаниям кожуха как абсолютно твердого тела. Седьмая частота составляет 106,04 Гц и соответствующая ей первая изгибная форма КЗП показана на рисунке 4. Проведенный анализ распределения полей деформаций в боковинах КЗП показал, что наибольшей деформации подвержены полукольца большой горловины, при этом наблюдается изгиб желоба кожуха. В направлении от горловины к краям боковин значения перемещений, возникающих при деформации кожуха, значительно уменьшаются.

2. Экспериментальная оценка динамических параметров конструкции КЗП. При изучении упругих колебаний конструкций отклик после некоторого начального воздействия с известной степенью точности может быть описан формулой вида [7]:

$$x(t) = \sum_{i=1}^m B_i e^{\alpha_i t} \cos(\omega_i t + \varphi_i), \quad (3)$$

где m – количество частот собственных колебаний, которые удается возбудить и зарегистрировать; B_i – амплитуды колебаний; φ_i – начальные фазы колебаний; α_i – коэффициенты затухания; ω_i – циклические частоты; t – время; $x(t)$ – перемещение, скорость или ускорение в некоторой точке конструкции.

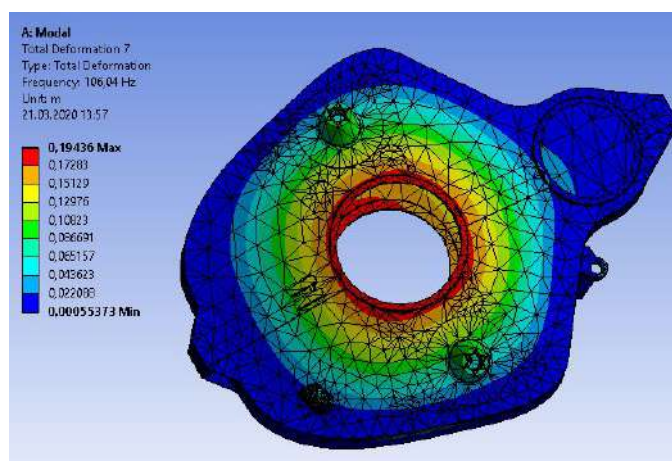


Рисунок 4 – Первая изгибная форма незакрепленного к тяговому двигателю КЗП электровоза ВЛ80^Р в горизонтальной плоскости

Для экспериментальной оценки собственных частот КЗП использован вибропреобразователь, закрепленный на кожухе, измеряющий процесс $x(t)$, а для возбуждения вибрации применен метод возбуждения колебаний одиночным ударом. В результате этого был получен спектр виброускорений в точке на кожухе (рисунок 5), где на некоторых частотах наблюдаются пиковые значения виброускорения, что свидетельствует о возникающих резонансных явлениях, которые возможны при наличии соответствующей собственной частоты изделия и совпадении ее с частотой возмущения.

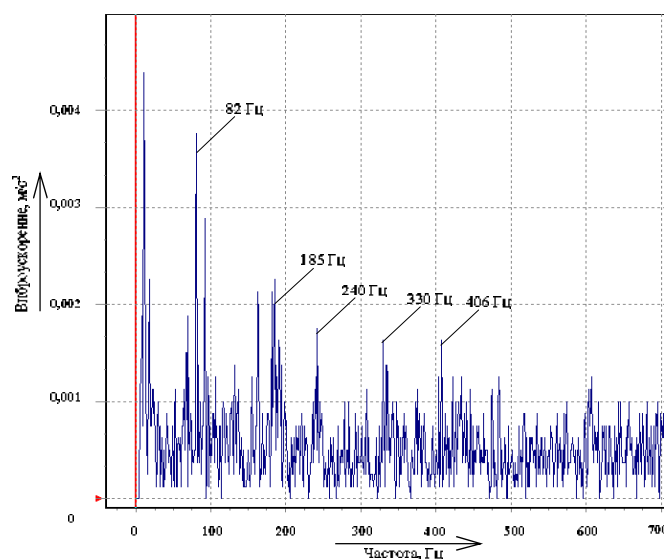


Рисунок 5 – Спектр виброускорений КЗП электровоза ВЛ80 при установке вибропреобразователя в зоне максимальной расчетной деформации

Добротность колебательной системы на частоте 82 Гц составила $Q = 20,7$ ед., логарифмический декремент затухания $\lambda = 0,1521$ ед., время релаксации $\tau = 80$ мс. Значения указанных динамических параметров для других собственных частот КЗП приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Динамические параметры конструкции КЗП

Расчетные данные					
Собственная частота f , Гц	83,54	179,17	240,96	316,29	395,71
Экспериментальные данные					
Собственная частота f , Гц	82	185	240	330	406
Добротность Q , ед.	20,7	18,1	55,1	34,5	983,9
Логарифмический декремент затухания λ , ед.	0,1521	0,1734	0,057	0,0576	0,0032
Время релаксации τ , мс	80	31	73	53	771

Спектры виброускорений, полученные экспериментальным путем при одинаковых условиях измерения для электропоездов ВЛ80^Р, ВЛ85 и 2(3)ЭС5К, имеют близкие значения, что может быть обусловлено схожей конструкцией кожухов.

3. Анализ собственных частот различных вариантов крепления КЗП. Собственные частоты можно определить непосредственно для самой конструкции кожуха, которые зависят от материала, топологии и жесткости конструкции, условий ее крепления. Кроме того, целесообразно рассмотреть собственные частоты колебательной системы, обусловленные колебаниями закрепленной массы кожуха, возбуждаемые инерционными силами колеблющегося корпуса тягового двигателя по всей цепочке передачи внешних возмущений.

В стыке деталей, соединенных болтами, установленными с зазором, что характерно и для стыка крепления КЗП к тяговому двигателю, под действием сил в его плоскости возникают касательные смещения. В некотором диапазоне действия нагрузок касательные смещения носят упругий характер и их величина определяется по линейной зависимости [8]:

$$\delta_{\tau} = k_{\tau} \tau, \quad (4)$$

где δ_{τ} – смещение в плоскости стыка, мкм; k_{τ} – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом контактной касательной податливости, значение данного коэффициента тем больше, чем меньше нормальное давление в стыке деталей, мкм/см²/Н; τ – касательные контактные напряжения, Н/см².

С учетом выражения (4) жесткость сопряжения «бобышка КЗП – кронштейн тягового двигателя» будет определяться по выражению

$$c_k = \frac{A}{k_{\tau}}, \quad (5)$$

где c_k – контактная касательная жесткость стыка крепления; A – площадь стыка.

Однако если в процессе эксплуатации произошло ослабление затяжки болта, то нормальное давление в стыке деталей становится близко к нулю и жесткость крепления в этом случае определяется податливостью болта на изгиб. В этом случае жесткость крепления c_b можно определить как величину, обратную податливости консольной балки по выражению [9]

$$c_b = \frac{1}{\lambda_b} = \frac{3EI_b}{a^3}, \quad (6)$$

где λ_6 – податливость болта крепления на изгиб; a – расстояние от точки закрепления болта до точки приложения нагружающей силы; E – модуль упругости; I_6 – момент инерции сечения при изгибе стержня болта.

Если точки крепления КЗП к тяговому двигателю амортизированы резинометаллическими втулками, как это предложено в работе [10], то жесткость крепления будет определяться жесткостью резинового элемента, работающего на сжатие радиальной силой. Для расчета жесткости резиновой втулки для такого случая нагружения в работе [11] приведена формула

$$c_p = \frac{P}{\Delta} = \frac{3\pi G l}{2\delta^3} \cdot \frac{l^2 + 6\delta^2}{l^2 + 3(r_1 + r_2)^2} (r_1 + r_2)^3, \quad (7)$$

где c_p – жесткость резиновой втулки; P – сжимающая радиальная сила; Δ – деформация резиновой втулки; G – статический модуль упругости при сдвиге; r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы резиновой втулки; δ и l – толщина стенки и длина резиновой втулки соответственно.

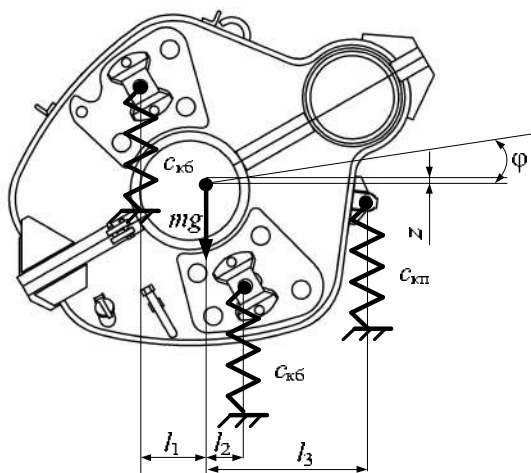


Рисунок 6 – Расчетная схема для математической модели КЗП

Таким образом, если принять во внимание упругий характер смещения КЗП, то можно получить расчетную схему, позволяющую определить собственные частоты рассматриваемой механической системы (рисунок 6). Так как крепление КЗП не предусматривает специальные устройства для рассеивания энергии колебаний, то силами сопротивления при нахождении собственных частот можно пренебречь.

Для КЗП в процессе эксплуатации можно рассматривать плоское движение в вертикальной плоскости [12]. При этом малые

свободные колебания в вертикальном направлении характеризуются уравнением $z = z(t)$, а малые свободные угловые колебания $\varphi = \varphi(t)$.

Таким образом, в качестве обобщенных координат для рассматриваемой механической системы приняты z и φ , следовательно, данная система будет иметь две степени свободы и можно составить два дифференциальных уравнения Лагранжа второго рода:

$$m\ddot{z} + (2c_{к.б} + c_{к.п})z + \varphi(c_{к.б}(l_2 - l_1) + c_{к.п}l_3) = 0; \quad (8)$$

$$I_c\ddot{\varphi} + \varphi(c_{к.б}(l_1^2 + l_2^2) + c_{к.п}l_3^2) + z(c_{к.б}(l_2 - l_1) + c_{к.п}l_3) = 0, \quad (9)$$

где m – масса КЗП; I_c – момент инерции КЗП относительно оси, проходящей через его точку центра тяжести перпендикулярно плоскости его движения; $c_{к.б}$ – жесткость в точке крепления «бобышка КЗП – кронштейн тягового двигателя»; $c_{к.п}$ – жесткость в точке крепления «кронштейн КЗП – подшипниковый щит тягового двигателя»; l_1 , l_2 и l_3 – расстояния от центра тяжести КЗП до точек его крепления.

Эти дифференциальные уравнения второго порядка связаны между собой только последними членами их левых частей. Следовательно, между собой связаны и колебания, характеризуемые координатами z и φ .

Решение уравнений (8), (9) будем искать в форме:

$$z = A \cos(\omega t + \alpha); \quad (10)$$

$$\varphi = \Phi \cos(\omega t + \alpha), \quad (11)$$

где A и Φ амплитуды колебаний.

Значения соответствующих производных z и φ определяются по уравнениям:

$$\ddot{z} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \alpha); \quad (12)$$

$$\ddot{\varphi} = -\omega^2 \Phi \cos(\omega t + \alpha). \quad (13)$$

Примем обозначения:

$$c_1 = 2c_{к.б} + c_{к.п}; \quad (14)$$

$$c_2 = c_{к.б}(l_2 - l_1) + c_{к.п}l_1; \quad (15)$$

$$c_3 = c_{к.б}(l_1^2 + l_2^2) + c_{к.п}l_3^2. \quad (16)$$

После подстановки уравнений (10) – (16) в соотношения (8), (9) и преобразований получим:

$$c_2 \Phi - (m\omega^2 - c_1)A = 0; \quad (17)$$

$$(I_c \omega^2 - c_3)\Phi - c_2 A = 0. \quad (18)$$

Из уравнений (17) и (18) находим отношение амплитуд:

$$\frac{A}{\Phi} = \frac{c_2}{m\omega^2 - c_1} = \frac{I_c \omega^2 - c_3}{c_2}. \quad (19)$$

Далее получаем уравнение для определения частот собственных колебаний (характеристическое уравнение):

$$I_c m \omega^4 - \omega^2 (I_c c_1 + c_3 m) + c_1 c_3 - c_2^2 = 0. \quad (20)$$

Корни биквадратного уравнения дают искомые собственные частоты колебаний КЗП:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{I_c c_1 + c_3 m + \sqrt{(I_c c_1 + c_3 m)^2 - 4 I_c m (c_1 c_3 - c_2^2)}}{2 I_c m}}; \quad (21)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{I_c c_1 + c_3 m - \sqrt{(I_c c_1 + c_3 m)^2 - 4 I_c m (c_1 c_3 - c_2^2)}}{2 I_c m}}. \quad (22)$$

Рассмотрим для КЗП три расчетных случая:

I. жесткость в точках крепления КЗП обеспечивается контактной жесткостью соединяемых деталей;

II. жесткость в точках крепления КЗП определяется жесткостью болтов, работающих на изгиб;

III. жесткость в точках крепления КЗП определяется жесткостью резиновых втулок, работающих на сжатие.

Согласно полученным результатам расчетов для рассматриваемых жесткостей крепления КЗП (таблица 2) наименьшая жесткость соответствует случаю наличия резиновых втулок в болтовых креплениях, при этом возникает наименьшее значение собственной частоты колебаний кожуха.

Таблица 2 – Расчет собственных частот колебаний КЗП

Расчетный случай	Значения жесткостей, кН/м		Значение собственных частот колебаний КЗП, Гц	
	$c_{к. б}$	$c_{к. п}$	ω_1	ω_2
I	38 900	14 000	772,762	335,82
II	101 400	48 920	1283	576
III	16 600	9 755	531,605	243,421

Сравнивая значения, полученные для частот вертикальных и крутильных колебаний КЗП для трех расчетных случаев его крепления, можно увидеть, что уровень возникающих частот будет зависеть от жесткости его крепления, а значения собственных частот находятся в диапазоне возможных возмущений. Значения собственных частот крутильных колебаний примерно в два раза меньше значений вертикальных колебаний КЗП.

Таким образом, значения собственных частот металлических кожухов зубчатой передачи получены путем численного исследования твердотельной модели кожуха, экспериментального определения вибропреобразователем с применением метода возбуждения колебаний одиночным ударом и решения дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода.

Полученные в результате численного исследования КЗП изгибные формы при разных условиях его закрепления позволили выявить участки боковин, подверженных наибольшей деформации. В случае закрепленного кожуха наибольшие перемещения возникают для крайних левой и правой точек, в случае незакрепленного кожуха наибольшие перемещения возникают в зоне горловины кожуха, расположенной в его центре. При этом уровень возникающих перемещений в случае незакрепленного кожуха несколько выше по сравнению с закрепленным, а собственные частоты незакрепленного кожуха снижаются по сравнению с жестко закрепленным. Полученное экспериментальным путем значение максимума виброускорения на частоте 82 Гц согласуется с расчетным значением собственной частоты, полученным для модели с жестким креплением КЗП, что свидетельствует об адекватности расчетных данных, полученных на модели КЗП при численном исследовании. Результатом решения дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода являются выражения для собственных частот, позволяющих учитывать разную жесткость креплений КЗП, тем самым дают возможность на этапе проектирования конструктивных изменений оценить динамические параметры кожуха. Знание уровня частот собственных колебаний, возникающих для КЗП в условиях его эксплуатации, позволяет конструкторам при разработке усовершенствований конструкции избежать условий работы на длительных эксплуатационных режимах при частотах, близких к резонансным.

Список литературы

1. Методы определения ресурса резервируемых несущих элементов подвижного состава и пути / Н. А. Махутов, Д. О. Резников [и др.]. – Текст : непосредственный // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2017. – № 3. – С. 19 – 39.
2. Павленко, А. П. Динамика тяговых приводов магистральных локомотивов / А. П. Павленко. – Москва : Машиностроение, 1991. – 190 с. – Текст : непосредственный.
3. Проблема надежности кожухов зубчатой передачи электровозов серии «Ермак» / Е. Ю. Дульский, И. О. Лобыцин [и др.]. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 4 (60). – С. 87 – 92.

4. Москвичев, В. В. Проблемы кожухов зубчатой передачи электровозов: отказы, нагруженность, виброзащита / В. В. Москвичев, Е. А. Чабан, А. Г. Андриевский. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 65. – № 1. – С. 31 – 42.
5. ГОСТ 17516.1-90 «Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам». – Москва : Изд-во стандартов, 2001. – 45 с. – Текст : непосредственный.
6. Секулович, М. Метод конечных элементов / М. Секулович; пер. с серб. Ю. Н. Зуева; под ред. В. Ш. Барбакадзе. – Москва : Стройиздат, 1993. – 660 с. – Текст : непосредственный.
7. Карклэ, П. Г. Определение частот и декрементов собственных колебаний конструкции по переходным процессам / П. Г. Карклэ. – Текст : непосредственный // Ученые записки ЦАГИ, 1988. – Т. XIX. – № 1. – С. 118 – 124.
8. Левина, З. М. Контактная жесткость машин / З. М. Левина, Д. Н. Решетов. – Москва : Машиностроение, 1971. – 264 с. – Текст : непосредственный.
9. Иосилевич, Г. Б. Детали машин : учебник / Г. Б. Иосилевич. – Москва : Машиностроение, 1988. – 366 с. – Текст : непосредственный.
10. Патент № 187956 Российская Федерация, МПК F16H 57/031; B61C 9/06. Кожух зубчатой передачи локомотива : № 2018122531 : заявлено 19.06.2018 : опубликовано 26.03.2019 / Андриевский А. Г., Романовский А. И.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения». – 8 с. – Текст : непосредственный.
11. Конструкция и динамика тепловозов : учебник; под ред. В. Н. Иванова. – 2-е изд., доп. – Москва : Транспорт, 1974. – 336 с. – Текст : непосредственный.
12. Яблонский, А. А. Курс теоретической механики : учебник / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – Санкт-Петербург : Лань, 1998. – 768 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Makhutov N. A., Reznikov D. O. and others. Methods for determining the lifetime of non-reserved load-bearing elements of rolling stock and the railway [Metody opredeleniya resursa rezerviruyemykh nesushchikh elementov podvizhnogo sostava i puti]. *Byulleten' Ob'yedinennogo uchenogo soveta OAO «RZHD» – Bulletin of Joint scientific Council of JSC Russian railways*, 2017, no. 3, pp. 19 – 39.
2. Pavlenko A. P. *Dinamika tyagovykh privodov magistral'nykh lokomotivov* (Dynamics of traction drives of mainline locomotives). Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1991, 190 p.
3. Dul'skii E. Yu., Lobytsin I. O., Milovanova E. A., Ivanov P. Yu. The problem of reliability of gear transmission casings of electric locomotives of the «Ermak» series [Problema nadezhnosti kozhukhov zubchatoy peredachi elektrovozov serii «Ermak»]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye – Modern Technologies. System analysis. Modeling*, 2018, no. 4 (60), pp. 87 – 92.
4. Moskvichev V. V., Chaban Ye. A., Andriyevskiy A. G. Problems of gear casing of electric locomotives: failures, loading, vibration insulation [Problemy kozhukhov zubchatoy peredachi elektrovozov: otkazy, nagruzhennost', vibrozashchita]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye – Modern Technologies. System analysis. Modeling*, 2020, no. 1 (65), pp. 31 – 42.
5. *Izdeliya elektrotekhnicheskoye. Obshchiye trebovaniya v chasti stoykosti k mekhanicheskomu vozdeystviyu faktora, GOST 17516.1-90* (Electrical products. General requirements in terms of resistance to mechanical external influencing factors GOST 17516.1-90). Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2001, 45 p.
6. Sekulovich M. *Metod konechnykh elementov* (Finite element method). Moscow: Stroyizdat Publ., 1993, 660 p.
7. Karkle P. G. Determination of the frequencies and decrements of the natural vibrations of the structure by transients [Opredeleniye chastot i dekrementov sobstvennykh kolebaniy po perekhodnym protsessam]. *Uchenyye zapiski TSAGI – TsAGI Science Journal*, 1988, vol. XIX, no. 1, pp. 118 – 124.

8. Levina Z. M. *Kontakt'naya zhestkost' mashin* (Contact stiffness of machines). Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1971, 264 p.
9. Iosilevich G. B. *Detali mashin* (Machine parts). Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1988, 366 p.
10. Andriyevskiy A. G., Romanovskiy A. I. *Patent RU 187956 RF*, 26.03.2019.
11. *Konstruktsiya i dinamika teplovozov* (The design and dynamics of diesel locomotives). Moscow: Transport Publ., 1974, 336 p.
12. Yablonskiy A. A., Nikiforova V. M. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki* (Theoretical Mechanics Course). Saint Petersburg: Lan Publ., 1998, 768 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андриевский Анатолий Геннадьевич

Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения.

Новой Зари, д. 2 и, г. Красноярск, 660028, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Эксплуатация железных дорог», КрИЖТ, ИрГУПС.

Тел.: +7 (913) 593-03-61.

E-mail: Andrievs1@yandex.ru

Москвичев Владимир Викторович

Красноярский филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий».

Мира пр., д. 53, г. Красноярск, 660049, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, директор Красноярского филиала федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий».

Тел.: +7 (391) 227-29-12.

E-mail: krasn@ict.nsc.ru

Чабан Елена Анатольевна

Красноярский институт железнодорожного транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения.

Новой Зари, д. 2 и, г. Красноярск, 660028, Российская Федерация.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Общепрофессиональные дисциплины», КрИЖТ, ИрГУПС.

Тел.: +7 (913) 522-62-17.

E-mail: chaban_tm@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Андриевский, А. Г. Расчетно-экспериментальное определение динамических характеристик кожуха тяговой зубчатой передачи электровоза / А. Г. Андриевский, В. В. Москвичев, Е. А. Чабан. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 47 – 57.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrievskiy Anatoly Gennadyevich

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport of Irkutsk State Transport University.

2 i, Novaia Zaria, Krasnoyarsk, 660028, the Russian Federation.

Senior lecturer at the Department «Railways Operation» (KIRT ISTU).

Phone: +7 (913) 593-03-61.

E-mail: Andrievs1@yandex.ru

Vladimir Viktorovich Moskvichev

Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies.

53 Mira St., Krasnoyarsk, 660049, the Russian Federation.

Doctor of Science in Engineering, Professor, Director of the Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk.

Phone: +7 (391) 227-29-12.

E-mail: krasn@ict.nsc.ru

Elena Anatolyevna Chaban

Krasnoyarsk Institute of Railway.

Transport of Irkutsk State Transport University.

2 i, Novaia Zaria, Krasnoyarsk, 660028, the Russian Federation.

Ph. D in Engineering Science, Associate Professor of the Department of General professional disciplines (KIRT ISTU).

Phone: +7 (913) 522-62-17.

E-mail: chaban_tm@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Andrievskiy A. G., Moskvichev V. V., Chaban E. A. Numerical-experimental determination of dynamic characteristics of the case of the drive gear of the electric locomotive. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 3 (43), pp. 47 – 57 (In Russian).

УДК 629.423

А. П. Семенов

ОАО «Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики
железнодорожного транспорта» ОАО «НИИТКД», г. Омск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЛОКОМОТИВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Аннотация. Разработана модель управления жизненным циклом локомотивов при их техническом обслуживании и ремонте (ТОиР) с использованием автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД). На основании статистического анализа данных об эксплуатации локомотивов теоретически обосновано влияние надежности локомотива и его системы технического обслуживания и ремонта на эффективность эксплуатации локомотивов. Разработаны методы анализа эффективности систем технического диагностирования с использованием математического аппарата теории информации и прогнозирования продолжительности времени технического обслуживания и ремонта с динамическим использованием накопленной статистики.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, локомотивы, жизненный цикл, техническое обслуживание и ремонт, диагностирование.

Alexander P. Semenov

Research Institute for Rail Transport Technology, Control and Diagnostics, Omsk, the Russian Federation

A MODEL DEVELOP FOR THE LOCOMOTIVES LIFE CYCLE MANAGING OF USING MODERN TECHNICAL DIAGNOSIS METHODS

Abstract. In the article it is developed a model for the locomotives life cycle managing in their maintenance and repair using automated technical diagnostic systems. Based on statistical analysis of data on the operation of locomotives, the impact of the reliability of the locomotive and its maintenance and repair system on the efficiency of locomotives is theoretically justified. A method of analyzing the technical diagnostic systems effectiveness using the mathematical apparatus of information theory and of predicting the duration of maintenance and repair time with the dynamic use of accumulated statistics on the duration of previous repairs has been developed.

Keywords: railway transport, locomotives, life cycle, maintenance and repair, diagnosis.

Согласно Долгосрочной программе развития ОАО «РЖД» до 2025 года планируется существенно повысить эффективность функционирования железнодорожного транспорта РФ, в том числе ставятся задачи существенного повышения надежности локомотивов как за счет совершенствования конструкции локомотива, так и за счет совершенствования системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР). В мировой практике имеется тенденция к переходу от планово-предупредительной системы ТОиР к ремонту по фактическому техническому состоянию, что стало возможным из-за развития автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) – как бортовых на базе микропроцессорных систем управления локомотива (МСУ), так и деповских переносных и стационарных АСТД. Задача разработки системы ТОиР с комплексным использованием АСТД по технологии киберфизических производственных систем (Cyber Physical Production Systems – CPPS) является актуальной [1, 2].

Для оценки эффективности эксплуатации локомотивов и влияния ТОиР выполнен анализ по предложенному коэффициенту полезной работы $K_{АП}$ [3, 4]:

$$K_{АП} = T_{\text{тяга}} / \sum T_i \quad \text{или:} \quad K_{АП} = 100 \% \cdot T_{\text{тяга}} / \sum T_i, \quad (1)$$

где $T_{\text{тяга}}$ – время нахождения локомотива в состоянии «Тяга в голове поезда» по кодировке информационной системы ОАО «РЖД» АСОУП;

ΣT_i – общее время жизненного цикла локомотива.

Анализ выполнен по большой выборке данных об эксплуатации локомотивов (Big Data) АСОУП: взяты репрезентативные выборки данных об эксплуатации локомотивов 12 массовых серий: ВЛ80С, ВЛ80Р, ВЛ85, 2ЭС5К, 3ЭС5К, ВЛ10, 2ЭС4К, 3ЭС4К, 2ТЭ10МК, 3ТЭ10МК, 2ТЭ116У, 2ТЭ25КМ. По каждой серии рассмотрено $K_1 = 40$ локомотивов за $\Sigma T_i = 400 - 500$ дней. Всего обработано 4,8 млн событий. Рассчитано математическое ожидание $K_{АП}$ и его среднеквадратичное отклонение (СКО) σ , коэффициент вариации K_v , минимальное min и максимальное max значения коэффициента по отдельным локомотивам за весь период наблюдения (таблица 1). Оценена унимодальность результатов по соответствию одному из законов распределения случайной величины по критерию Пирсона с использованием параметра χ^2 и расчетом вероятности соответствия закону [5]. Исходная выборка K_1 сокращена до K_2 по правилу трех сигм.

Таблица 1 – Коэффициент полезной работы локомотивов $K_{АП}$

Серия	K_2	$K_{АП}, \%$	σ	K_v	min, %	max, %	χ^2	P
ВЛ80С	40	53	14,2	0,3	18	73	8,7	0,05
ВЛ80Р	39	65	5,4	0,1	53	73	7,4	0,1
ВЛ85	39	71	3,6	0,1	60	76	19,9	0
2ЭС5К	40	44	12,8	0,3	16	71	3,3	0,5
3ЭС5К	39	66	8,1	0,1	29	76	290,3	0
ВЛ10	40	40	13,2	0,3	7	52	42,5	0
2ЭС4К	40	33	11,2	0,3	5	50	8,1	0,05
3ЭС4К	40	51	6,9	0,1	34	58	23,1	0
2ТЭ10МК	40	34	12,3	0,4	14	57	8,0	0,05
3ТЭ10МК	40	37	13,0	0,3	5	56	13,5	0,001
2ТЭ116У	40	40	10,9	0,3	15	58	11,8	0,01
2ТЭ25КМ	40	41	7,0	0,2	24	50	14,5	0,001
В среднем		48				76		

Для анализа разработан специальный пакет программ на алгоритмическом языке VBA в среде Excel [3, 4]. В среднем коэффициент полезной работы локомотива $K_{АП}$ составляет у тепловозов 38,3 %, а у электровозов 60 % с возможностью достичь 57,5 и 76,2 %. Главный резерв – в повышении эффективности организации перевозочного процесса. Время, затрачиваемое на ТОиР локомотивов, составляет около 10 % у электровозов и 20 % у тепловозов (таблица 2).

Таким образом, главный резерв повышения эффективности эксплуатации локомотивов – повышение качества организации движения поездов. На втором, не менее важном месте – организация технического обслуживания и ремонта (ТОиР) локомотивов, повышение его эффективности, в том числе за счет комплексного использования автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД). Этому и посвящены исследования автора.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 2 – Процент времени ТОиР в общем бюджете локомотива

Серия	K ₂	ТОиР, %	σ	K _v	min, %	max, %	χ ²	P
ВЛ80С	38	10,4	3,74	0,36	4,1	20,1	4,7	0,3
ВЛ80Р	39	10,8	2,07	0,19	6,6	14,6	1,7	0,7
ВЛ85	39	10,4	1,94	0,19	6,0	14,4	2,2	0,7
2ЭС5К	39	10,5	4,59	0,44	2,9	20,4	6,7	0,1
3ЭС5К	40	9,8	3,86	0,39	4,7	18,5	10,8	0,02
ВЛ10	39	12,9	6,63	0,51	2,5	30,8	14,7	0,001
2ЭС4К	40	16,7	6,87	0,41	5,1	37,1	5,4	0,2
3ЭС4К	39	11,8	5,16	0,44	5,8	26,5	10,8	0,02
2ТЭ10МК	40	20,4	7,29	0,36	5,4	36,8	2,3	0,5
3ТЭ10МК	40	25,3	9,46	0,37	10,2	51,9	6,0	0,1
2ТЭ116У	39	18,5	6,42	0,35	8,2	33,6	2,1	0,7
2ТЭ25КМ	39	14,9	4,22	0,28	6,7	23,9	7,8	0,05

При диагностировании выделяются процессы определения правильности функционирования, проверки работоспособности и исправности. Гносеологически диагностирование носит характер уменьшения энтропии знаний о техническом состоянии локомотива. Энтропия конечна, но порядок ее уменьшения носит асимптотический характер, что может привести к необоснованно длительному времени диагностирования. Разработан метод анализа эффективности АСТД через их способность $I_{\text{АСТД}}$ уменьшать энтропию знаний I_{Σ} о техническом состоянии объекта диагностирования, для чего введен коэффициент эффективности АСТД $k_{\text{АСТД}}$:

$$k_{\text{АСТД}} = I_{\text{АСТД}} / I_{\Sigma} = [\sum_{i=0}^N (z_i \cdot I_i)] / [\sum_{i=0}^N I_i] =$$

$$= [\sum_{i=0}^N (z_i \cdot P_i \cdot (C_i/S) \cdot \log_2(P_i \cdot (C_i/S)))] / [\sum_{i=0}^N (P_i \cdot (C_i/S) \cdot \log_2(P_i \cdot (C_i/S)))], \quad (2)$$

где $z_i = \{0, 1\}$ – наличие в АСТД диагностирования i -того отказа;

$I_i = P_i \cdot \log_2(P_i)$ – информативность АСТД, определяемая по формуле Шеннона;

$I_i = P_i \cdot (C_i/S) \cdot \log_2(P_i \cdot (C_i/S))$ – информативность АСТД;

P_i – вероятность i -го события при условии, что $\sum_{i=0}^N P_i \leq 1$;

C_i – стоимость восстановления после i -го отказа;

$S = \sum_{i=0}^N C_i$ – суммарная стоимость ремонтов;

N – число неисправных технических состояний.

Самые эффективные бортовые системы технического диагностирования [6] недостаточны для управления техническим состоянием локомотива: необходимы стационарные и переносные АСТД. Результаты расчета информативности АСТД по их способности уменьшать энтропию знаний о техническом состоянии локомотива приведены в таблицах 3 – 6, где λ_i – интенсивность отказов (число отказов на 1 млн км);

P_i – вероятность наступления отказа между двумя плановыми заходами в локомотивное депо на ремонт в объеме ТР-1 (50 тыс. км). Вероятность исправного состояния P_0 соответствует вероятности, что ни один отказ не наступит: $P_0 = (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot (1 - P_2) \cdot \dots = \prod (1 - P_i)$;

C_i – относительно ТЭД стоимость восстановления работоспособности;

$C_{i/}$ – удельная стоимость восстановления работоспособности: $\sum C_{i/} = 1$;

H_i и H_{Σ} – энтропия отказа и всех ожидаемых отказов.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 3 – Информативность бортового диагностирования ($k_{\text{АСТД}} = 0,454$)

№ п/п	Диагностирование	λ	P_i	C_i	$C_{i/}$	z_i	H_i	$I_{\text{АСТД}}$
0	Работоспособность	–	0,368	0,01	0,001	0,9	0,005	0,004
1	Механическое оборудование	2,2	0,104	1,20	0,136	0,1	0,087	0,009
2	ТЭД	2,06	0,098	3,00	0,340	0,31	0,164	0,051
3	ВИП и МСУД	1,88	0,090	0,70	0,079	0,8	0,051	0,041
4	Электрооборудование	9,74	0,386	1,00	0,114	0,5	0,198	0,099
5	Вспомогательные машины	0,32	0,016	1,10	0,125	0,8	0,018	0,014
6	Тормоза и пневматика	3,36	0,155	0,50	0,057	0,7	0,060	0,042
7	Приборы безопасности	0,38	0,019	0,50	0,057	0,9	0,010	0,009
8	Вентиляция	0,06	0,003	0,80	0,091	0,5	0,003	0,002
Σ					1		0,595	0,270

При переходе на ТООР с АСТД необходимо прогнозировать время выдачи каждого локомотива [7 – 10]. Предложен метод прогнозирования с использованием технологии «Цифровой двойник» с имитационной вероятностно-статистической моделью ТООР: по данным АСТД составляется индивидуальный сетевой график ремонта каждой секции локомотива и имитационным моделированием определяется вероятность окончания ремонта для ожидаемых периодов времени.

Таблица 4 – Информативность АПК Борт ($k_{\text{БОРТ}} = 0,571$)

№ п/п	Диагностирование	λ	P_i	C_i	$C_{i/}$	z_i	H_i	$I_{\text{АСТД}}$
0	Работоспособность	–	0,135	0,03	0,001	0,8	0,002	0,002
1	Система охлаждения	17,78	0,589	1,00	0,040	0,8	0,127	0,102
2	Масляная система	6,22	0,267	2,50	0,100	0,7	0,139	0,098
3	Турбокомпрессор	5,33	0,234	4,00	0,160	0,6	0,177	0,106
4	Топливная аппаратура	4,44	0,199	3,00	0,120	0,5	0,129	0,064
5	Цилиндропоршневая группа	0,89	0,044	4,00	0,160	0,7	0,049	0,035
6	Система управления ДГУ	4,44	0,199	0,50	0,020	0,5	0,032	0,016
7	Механическая подсистема	0,89	0,043	10,00	0,400	0,1	0,102	0,010
Σ					1		0,758	0,433

Таблица 5 – Информативность комплекса «Кипарис» ($k_{\text{Кипарис}} = 0,864$)

№ п/п	Диагностирование	λ	P_i	C_i	$C_{i/}$	z_i	H_i	$I_{\text{АСТД}}$
0	Работоспособность	–	0,135	0,03	0,001	0,95	0,002	0,002
1	Система охлаждения	17,78	0,589	1,00	0,040	0,95	0,127	0,121
2	Масляная система	6,22	0,267	2,50	0,099	0,95	0,139	0,133
3	Турбокомпрессор	5,33	0,234	4,00	0,159	0,9	0,177	0,159
4	Топливная аппаратура	4,44	0,199	3,00	0,119	0,9	0,129	0,116
5	Цилиндропоршневая группа	0,89	0,044	4,00	0,159	0,9	0,049	0,045
6	Система управления ДГУ	4,44	0,199	0,50	0,020	0,9	0,032	0,029
7	Механическая подсистема	0,89	0,043	10,0	0,399	0,5	0,102	0,051
Σ					1		0,758	0,655

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 6 – Информативность вибродиагностики КМБ ($k_{\text{КМБ}} = 0,923$)

№ п/п	Диагностирование	λ	P_i	C_i	$C_{i/}$	z_i	H_i	$I_{\text{АСТД}}$
0	Работоспособность	—	0,779	0,01	0,001	0,98	0,007	0,007
1	Шестерёнки	1	0,049	1,00	0,088	0,95	0,034	0,032
2	БЗК	0,75	0,037	2,00	0,177	0,95	0,047	0,045
3	МЯП	1,25	0,061	2,00	0,177	0,98	0,070	0,069
4	Щёткодержатели	0,5	0,025	0,50	0,044	0,8	0,011	0,009
5	Коллектор	0,25	0,012	3,00	0,265	0,9	0,027	0,025
6	МОП	0,5	0,025	1,00	0,088	0,9	0,019	0,017
7	Буксы	0,5	0,025	1,00	0,088	0,9	0,019	0,017
8	Подвеска	0,25	0,012	0,80	0,071	0,5	0,009	0,005
Σ					1		0,244	0,225

На основании выполненных исследований в области надежности локомотивов и влияния системы ТОиР на эффективность их эксплуатации, информационной эффективности АСТД, технико-экономического обоснования целесообразности применения АСТД, а также результатов разработки системы прогнозирования времени проведения ТОиР модель управления жизненным циклом локомотивов на этапе их эксплуатации при проведении ТОиР с использованием АСТД можно сформулировать так: на этапе разработки и изготовления тягового подвижного состава (ТПС) предусматривается бортовая автоматизированная система технического диагностирования. Информация в режиме online или при заходе локомотива на ТОиР вводится в АСУ ТОиР, построенная по правилам ERP- и MES-систем. При заходе локомотива в депо на ТОиР, в процессе ТОиР и при выдаче локомотива на линию производится диагностирование оборудования с использованием стационарных и переносных АСТД. Данные вводятся в АСУ ТОиР. По результатам диагностирования всеми видами АСТД формируется индивидуальный для каждой секции объем ТОиР, планируются необходимые ресурсы. Составляется график выполнения ТОиР, по которому производится имитационное моделирование с целью определения ожидаемого времени выдачи локомотива на линию. Далее АСУ ТОиР автоматически контролирует исполнение ТОиР с возможностью принятия корректирующих мер. Накопленная в АСУ ТОиР информация периодически подвергается факторному анализу для постоянного совершенствования технологических процессов ТОиР.

В настоящее время по предложенной модели практически реализованы технические и технологические решения для ТОиР с комплексным использованием АСТД на примере электровозов ЭС5К НЭВЗ, обслуживаемых в СЛД «Братск» группы компаний «ЛокоТех» [1] (рисунки 1, 2).



Рисунок 1 – Архитектура цифрового депо

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



Рисунок 2 – Универсальная ремонтная канава в СЛД «Братск»

Техническую основу цифрового депо составляет комплексная универсальная ремонтная позиция на основе механизации, информатизации, цифровизации и комплексного диагностирования. Информационную основу цифрового депо составляет АСУ ТООР, управляющая всеми процессами локомотивного депо, в качестве которой взята информационная система АСУ «Сетевой график» (АСУ СГ), реализованная на базе пакета программ 1С и внедренная в 85 сервисных локомотивных депо ЛокоТех-Сервис. Система выполняет функции ERP- и MES-систем: планирование ремонтов и формирование сменно-суточных заданий, мониторинг технологических процессов, управление зарплатой и складом, бухгалтерия и др. Ввод информации о техническом состоянии локомотивов и работе производства заменен с ручного на автоматизированный, для чего с помощью единой интеграционной платформы на базе технологий IOT & SOA осуществляется сбор информации от всех доступных автоматизированных источников информации, в том числе мобильных и АСТД. Как отдельная информационная система организовано управление жизненным циклом колесных пар. Для контроля работы технологического оборудования автоматически контролируется их работа с помощью специальных датчиков или встроенной в систему управления оборудованием функциональности. Цифровое депо взаимодействует с внешними информационными системами – АСУ Трансмашхолдинг, ОАО «РЖД» и другими смежными системами. В результате до минимума сведено отрицательное влияние человеческого фактора.

Таким образом, автором разработана модель управления жизненным циклом локомотивов при их техническом обслуживании и ремонте с использованием автоматизированных систем технического диагностирования, для чего на основании статистического анализа данных об эксплуатации локомотивов теоретически обоснована степень влияния надежности локомотива и его системы технического обслуживания и ремонта на эффективность эксплуатации локомотивов.

Разработан метод анализа эффективности систем технического диагностирования с использованием математического аппарата теории информации, показывающий их информационную значимость и самодостаточность. В частности, доказана информационная ограниченность бортовых АСТД.

Разработан метод прогнозирования продолжительности времени технического обслуживания и ремонта с динамическим использованием накопленной статистики.

Список литературы

1. Цифровое депо – технологическая основа цифровой трансформации локомотивного комплекса / А. П. Семенов, О. С. Валинский, А. М. Лубягов [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 3. – С. 26 – 32.
2. Семенов, А. П. Свид. 2020661153 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Вероятностно-статистическое моделирование работы ремонтного локомотивного депо с целью прогнозирования времени выполнения технического обслуживания и ремонта (ТОиР). / А. П. Семенов, И. К. Лакин. – Заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU) : заявлено 09.09. 2020. – Текст : непосредственный.
3. Семенов, А. П. Свид. 2020661903 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Статистический анализ эффективности эксплуатации локомотивов / А. П. Семенов, И. К. Лакин. – Заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU) : заявлено 16.09. 2020. – Текст : непосредственный.
4. Семенов, А. П. Информационная энтропия систем технического диагностирования локомотивов / А. П. Семенов, И. К. Лакин, И. Ю. Хромов. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3. – С. 42 – 53.
5. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Академия, 2003. – 464 с. – Текст : непосредственный.
6. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К. В. Липа, А. А. Белинский, В. Н. Пустовой [и др.]. – Москва : Локомотивные технологии, 2015. – 212 с. – Текст : непосредственный.
7. Аболмасов, А. А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аболмасов Алексей Александрович; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 2017. – 180 с. – Текст : непосредственный.
8. Лакин, И. И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание степени кандидата технических наук / Лакин Игорь Игоревич; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 2016. – 195 с. – Текст : непосредственный.
9. Пустовой, И. В. Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов : специальность 05.02.22 «Организация производства (транспорт)» : диссертация на соискание степени кандидата технических наук / Пустовой Илья Владимирович; Омский гос. университет путей сообщения. – Омск, 2018. – 183 с. – Текст : непосредственный.
10. Лакин, И. К. Разработка теории и программно-технических средств комплексной автоматизированной справочно-информационной и управляющей системы локомотивного депо : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание степени доктора технических наук / Лакин Игорь Капитонович; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 1997. – 377 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Semenov A. P., Valinskiy O. S., Lubyagov A. M., Mavrin A. N., Kazarin D. V. Digital depot is the technological basis for the digital transformation of the locomotive complex [Cifrovoye depo – tekhnologicheskaya osnova cifrovoy transformacii locomotivnogo kompleksa]. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway Transport*, 2020, no. 3, pp. 26 – 32.

2. Semenov A. P., Lakin I. K. Certificate 2020661153 The Russian Federation. Certificate of state registration of the program for computers, 09.09. 2020.
3. Semenov A. P. Certificate 2020661903 The Russian Federation. Certificate of state registration of the program for computers, 16.09. 2020.
4. Semenov A. P. Locomotive Diagnostic Systems Information Entropy [Informatcionnaya entropiya system tekhnicheskogo diagnostirovaniya locomotivov]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technology. System analysis. Modeling*, 2020, no. 3, pp. 42 – 53.
5. Ventcel E. S., Ovcharov V. A. *Teoriya veroyatnosti i eyo inzhenernye prilozhenia* (Probability Theory and its engineering applications). Moscow: Academy Publ., 2003, 464 p.
6. Lipa K. V., Belinsky A. A., Pustovoy V. N., Lyangasov S. L., Lakin I. K., Abolmasov A. A. and others. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov expluatacii locomotivov. Teoria i praxica* (Monitoring the technical condition and modes of operation of locomotives. Theory and practice). Moscow: Locomotivniye Tekhnologii Publ., 2015, 212 p.
7. Abolmasov A. A. *Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem tyagovogo podvizhnogo sostava v usloviakh servisnogo obsluzhivania* (Management of the technical condition of traction rolling stock in service conditions). Ph. D. thesis, Moscow, Moscow Railway State University, 2017, 180 p.
8. Lakin I. I. *Monitoring tekhnicheskogo ckcnyaniya lokomotivov po dannim bortovih apparatno-programnih kompleksov* (Monitoring the technical condition of locomotives according to on-board hardware and software systems). Ph. D. thesis, Moscow, Moscow Railway State University, 2016, 195 p.
9. Pustovoy I. V. *Razrabotka informacionno-dinamicheskoy modeli upravleniya tekhnicheskimi obsluzhivaniem i remontom locomotivov* (Develop an information-dynamic model for managing service maintenance and repairing locomotives). Ph. D. thesis, Omsk, Omsk State Transport University, 2018, 183 p.
10. Lakin I. K. *Razrabotka teorii i programmno-tekhnicheskikh sredstv kompleksnoi avtomatizirovannoi spravochno-informatsionnoi i upravliaiushchei sistemy lokomotivnogo depo* (Development of theory and software tools of a comprehensive automated reference information and control system of the locomotive depot). Doctor's thesis, Moscow, Moscow Railway State University, 1997, 377 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Семенов Александр Павлович

ОАО «Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта» (НИИТКД).

Избышева ул., д. 3, корп. 2, г. Омск, 644005, Российская Федерация.

Генеральный директор, кандидат технических наук.

Тел.: +7 (3812) 443-915.

E-mail: Corp@niitkd.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Semenov Alexander Pavlovich

Research Institute for The Technology, Control and Diagnostics of Rail Transport (NIITKD).

Izbyшева st., 3, bldg. 2, Omsk, 644005, Russian Federation/

CEO, Ph. D. in Engineering.

Phone: +7 (3812) 443-915.

E-mail: Corp@niitkd.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Семенов, А. П. Разработка модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования / А. П. Семенов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 58 – 65.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Semenov A. P. A Model Develop for the Locomotives Life Cycle Managing of Using Modern Technical Diagnosis Methods. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 3 (43), pp. 58 – 65 (In Russian).

УДК 621.331.1

А. Е. Перестенко

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

КОНТРОЛЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА И УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

Аннотация. В статье приведены основные результаты проведения экспериментальных исследований в границах межподстанционных зон Фадино – Новоселецк, Новоселецк – Стрела участка Входная – Иртышское. В результате проведения исследований выявлены проблемы, которые в настоящее время препятствуют организации онлайн-мониторинга эксплуатационных показателей электроподвижного состава (ЭПС) и устройств электроснабжения: недостаточность данных о работе тяговых подстанций, наличие ЭПС без систем регистрации параметров движения (РПД), отсутствие процесса по сбору данных с РПД, отсутствие единого источника и процесса по получению данных, недостаточный объем памяти запоминающего устройства картриджа, отсутствие фиксации данных о работе локомотива в целом, недостаточный набор фиксируемых параметров, непостоянная дискретизация фиксации параметров, недостаточно детальная итоговая документация, несовершенство программного обеспечения для экспорта данных с картриджей и отсутствие привязки к глобальному времени. Показана возможность организации стыковки данных с различных автоматизированных систем ОАО «РЖД» и измерительных систем ОмГУПСа, которая позволит оценивать потери в тяговой сети, расход на собственные нужды электроподвижного состава, расход электроэнергии на тягу и возврат электроэнергии в контактную сеть, а также перейти к реализации предикативного управления режимами работы электроподвижного состава и энергетической инфраструктуры железных дорог в изменяющихся условиях перевозочного процесса, что позволит обеспечить наилучшие условия для реализации силы тяги, рекуперативного торможения, заданных графиков движения поездов, в том числе при критических ограничениях со стороны системы электроснабжения, не допуская остановки движения поездов.

Ключевые слова: электроподвижной состав, устройства электроснабжения, 2ЭС6, расход электроэнергии на тягу, потери электроэнергии в тяговой сети, синхронные измерения.

Artem E. Perestenko

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

MONITORING OF PERFORMANCE INDICATORS OF ELECTRIC ROLLING STOCK AND POWER SUPPLY DEVICES USING BIG DATA PROCESSING TECHNOLOGIES

Abstract. The article presents the main results of experimental studies within the boundaries of the Fadino – Novoseletsk, Novoseletsk – Strela interstitial zones of the Entrance - Irtysh section. As a result of the research identified problems that currently hinder the online monitoring of operational parameters of the electric rolling stock (EPS) and power supply devices: a lack of data on the work of the traction substations, the presence of EPS without registration motion parameters (RAPS), the lack of process data collection with RAP, the lack of a single source and process for obtaining data, insufficient memory storage device of cartridge, lack of data latch on the locomotive in General, lack a set of fixed parameters, non-constant sampling of parameter fixing, insufficiently detailed final documentation, imperfect software for exporting data from cartridges and lack of binding to global time. Shown the possibility of joining data from different automated systems of JSC "RZD" and measuring systems OSTU, which will allow us to estimate the losses in the traction network, the expense on own needs of electric rolling stock, the electric power consumption for traction and return of electric energy to contact network, as well as move forward with implementation of predictive control operation modes of the electric rolling stock and power infrastructure and Railways in a changing environment in the transportation process, to ensure the best conditions for the realization of tractive effort, regenerative braking, set train schedules, including in case of critical restrictions on the part of the power supply system, preventing train traffic from stopping.

Keywords: electric rolling stock, power supply devices, 2ES6, traction energy consumption, power losses in the traction network, synchronous measurements.

Согласно стратегии научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» одной из приоритетных целей развития на период до 2020 г. и перспективу до 2025 г. является повышение энергетической эффективности основной деятельности и снижение энергоемкости перевозочного процесса. Достигнуть данной цели планируется, в том числе, переходом от реактивного к проактивному способу управления перевозочным процессом посредством разработки и внедрения интеллектуальных предикативных и аналитических систем. Схожие задачи ставят перед собой и другие крупнейшие железнодорожные системы мира: Евросоюз, Китай, США. Построение названных выше систем выдвигает строгие требования к уровням цифровизации железнодорожного комплекса, стандартизации и унификации устройств и протоколов, общности и связности подсистем железнодорожного транспорта [1 – 3].

В работах [4 – 12] были заложены методические основы обработки данных систем ОАО «РЖД». Автором настоящей статьи была апробирована возможность объединения существующих данных о тяге поездов из различных источников с целью определения различных параметров в пределах межподстанционных зон (МПЗ) и оценена готовность существующих автоматизированных систем ОАО «РЖД» и измерительных систем ОмГУПС (ИС ОмГУПС) к проведению онлайн-мониторинга эксплуатационных показателей ЭПС и устройств электроснабжения.

Для этого на Западно-Сибирской железной дороге был проведен эксперимент. Полигоном для проведения исследований определен участок Фадино – Новоселецк – Стрела Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги». В ходе проведения экспериментальных работ производились синхронные измерения на тяговых подстанциях (ТП) Фадино, Новоселецк, Стрела и обращающихся на участке электровозах 2ЭС6.

Измерения на электроподвижном составе осуществлялись посредством регистратора параметров МСУЛ РПМ производства ООО «НПО САУТ» (РПМ) и регистратора параметров движения и автоведения грузового электровоза РПДА-Г производства ООО «АВП Технология» (РПДА-Г). Стоит отметить, что система РПДА-Г на электровозе 2ЭС6 установлена не в полном объеме и фиксирует информацию со штатных датчиков микропроцессорной системы управления и диагностики МПСУиД производства ООО «НПО САУТ». Кроме того, РПДА-Г устанавливается только на электровозах 2ЭС6, работающих с интеллектуальной системой автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины с распределенными по длине локомотивами ИСАВП-РТ.

Измерения на фидерах контактной сети тяговых подстанций выполнялись с помощью прошедших процедуру калибровки ИС ОмГУПС. В целях проверки корректности измерений для подстанции Новоселецк все фидеры ее контактной сети были оборудованы названными выше системами.

Информация о проследующих рассматриваемый участок поездах дополнялась сведениями из автоматизированной системы ведения и анализа графика исполненного движения ГИД «Урал-ВНИИЖТ» (ГИД) и отчетов «Расход топлива по номеру поезда», «Расход ТЭР по машинистам» системы КИХ ЛП «Локомотивные парки».

На первом этапе эксперимента на тяговой подстанции Новоселецк была произведена оценка потерь электроэнергии в понижающих и преобразовательных трансформаторах и сглаживающих фильтрах тяговых подстанций путем сравнения энергий – полученной из внешней энергосистемы по данным автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) $W_{\text{ТП}}$, вычисленной по формуле (1) и отпущенной в контактную сеть по данным ИС ОмГУПС $W_{\text{КС}}$, вычисленной по формуле (2):

$$W_{\text{ТП}} = \sum_{i \in A} \sum_{k \in \{a,b,c\}} P_i^k, \quad (1)$$

где i – индекс измерения счетчика АСКУЭ в границах суток;
 A – множество всех измерений счетчика АСКУЭ в границах суток;
 k – индекс фазы ТП Новоселецк;
 P – мгновенная активная мощность, кВт·ч;

$$W_{\text{КС}} = \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \sum_{i \in B} \sum_{k \in \{1,2,4,5\}} U_i^k I_i^k, \quad (2)$$

где i – индекс измерения ИС ОмГУПС в границах суток;
 B – множество измерений ИС ОмГУПС, произведенных в те же моменты времени, что и измерения счетчиком АСКУЭ в границах суток;
 k – индекс фидера контактной сети ТП Новоселецк;
 U – напряжение на фидере контактной сети, В;
 I – ток фидера контактной сети, А.

Оценка указанных потерь производилась в течение 51 дня. По данным АСКУЭ фиксировались значения мгновенных мощностей с частотой дискретизации одна минута, а по данным ИС ОмГУПС одна секунда.

Согласно материалам статьи [4] значения потерь электроэнергии в понижающих и преобразовательных трансформаторах и сглаживающих фильтрах тяговых подстанций с учетом погрешностей измерений должны укладываться в диапазон от 0,3 до 5,25 %.

В результате эксперимента установлено, что в 44 сутках (≈ 90 %) значения потерь лежат в указанном диапазоне, в пяти сутках значения потерь выходят за верхнюю границу диапазона, но не более чем на 1 %. Результаты сравнения представлены на рисунке 1.

В процессе второго этапа исследования был выявлен ряд технических и организационных несовершенств, препятствующих проведению онлайн-мониторинга эксплуатационных показателей, наиболее значимые из которых представлены в таблице 1.

Так как РПДА-Г обеспечило фиксацию информации о значительно большем по сравнению с РПМ числе поездов, а данные с последней системы обладают недостаточно высокой детализацией и требуют большего числа допущений и преобразований [8], для определения параметров ЭПС использовалась информация с картриджей РПДА-Г.

После сбора достаточного количества данных они были подвергнуты многоступенчатой обработке, общая схема которой представлена на рисунке 2. Детальное описание произведенных процедур обработки выходит за рамки данной статьи, но необходимо отметить, что для перехода к периоду измерений в одну секунду отсутствующие значения параметров вычислялись приближенно путем линейной интерполяции, а избыточные значения усреднялись. Не фиксируемый РПДА-Г ток собственных нужд электровоза 2ЭС6 $I_{\text{с.н}}$ вычислялся приближенно по формуле:

$$I_{\text{с.н}} = \frac{P_{\text{с.н}}^{\text{норм}}}{U_{\text{КС}}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{с.н}}^{\text{норм}}$ – нормативное значение мощности собственных нужд согласно ПТР 2016, Вт;
 $U_{\text{КС}}$ – напряжение на токоприемнике, В.

Далее были отобраны фрагменты полученных временных рядов, удовлетворяющие следующим условиям:

информация о параметрах ЭПС зафиксирована системой РПДА-Г всего периода проследования ЭПС через МПЗ;

информация о параметрах фидеров тяговой сети зафиксирована счетчиками на всех питающих МПЗ фидерах для всего периода;

на протяжении всего периода в МПЗ отсутствовал подвижной состав со значительным энергопотреблением, информация о работе которого не существует либо недоступна.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

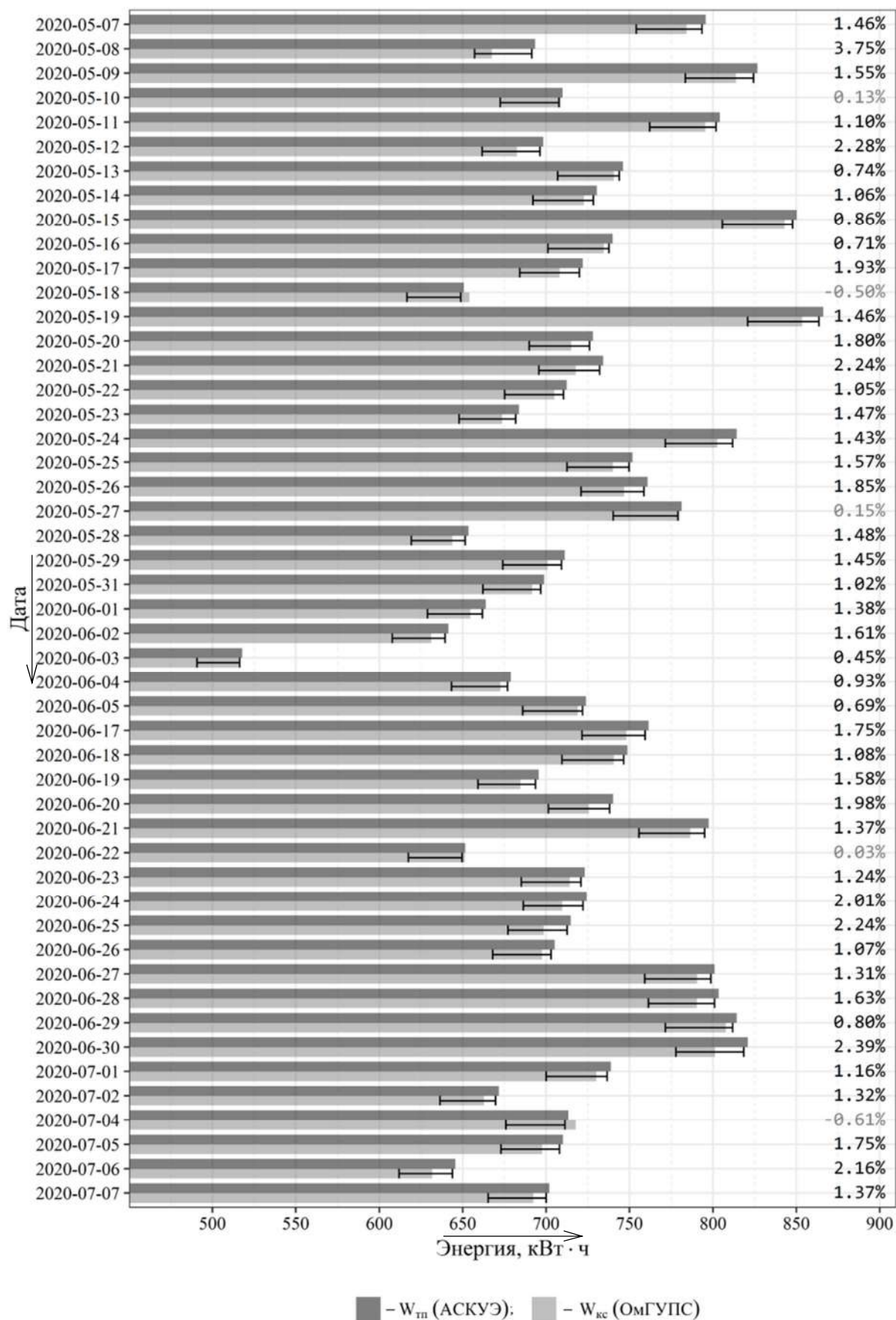


Рисунок 1 – Результаты сравнения данных от АСКУЭ и измерительных систем ОмГУПС

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 1 – Обнаруженные в процессе исследования препятствия для реализации онлайн-мониторинга эксплуатационных показателей

Затрагиваемые системы и процессы	Краткое описание	Детальное описание	Эффект
АСКУЭ	Недостаточность данных о работе тяговых подстанций	Недостаточная частота фиксации параметров счетчиками (в среднем 52 записи на один час работы)	Потеря точности
Измерительные системы тяговых подстанций	Недостаточное покрытие ЭПС системами РПД	Невозможно установить объем отпущенной за произвольный период в конкретную МПЗ энергии из-за отсутствия систем измерений на фидерах контактной сети	Отсутствие сведений о работе тяговой сети
ЭПС	Отсутствие процесса по сбору данных с РПД	Для большинства проследований МПЗ на последней присутствуют не оснащенные РПД единицы подвижного состава	Отсутствие сведений о работе тяговой сети и ЭПС
Организация сбора и хранения данных	Отсутствие единого источника и процесса по получению данных	Для большинства проследований МПЗ на последней присутствуют единицы подвижного состава, данные о работе которой отсутствуют, из-за чего невозможно определить значение потерь в контактной сети	
		Неизвестно, существуют ли необходимые данные	
		Неизвестно место хранения необходимых данных	Высокие трудозатраты получения данных
		Отсутствуют стандартные процедура и механизм получения данных	
МСУЛ-РПМ	Недостаточный объем ПЗУ картриджа	Объема памяти достаточно для хранения в среднем периода в два – пять дней, после чего перезаписываются наиболее старые данные. При этом период между сбором данных существенно превышает период их хранения в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ)	Утрата значительного объема производимых данных
	Фиксируются данные о работе каждой секции, но не локомотива целиком	Информация о работе некоторых секций может отсутствовать или быть некорректной	Отсутствие сведений о работе ЭПС
		Возможно несовпадение временных меток между секциями, из-за чего невозможно точно определить время записи	Потеря точности
РПДА-Г	Недостаточный набор фиксируемых параметров	Не фиксируется ток собственных нужд	Отсутствие сведений о работе ЭПС
		Вместо токов пар двигателей фиксируется единичное значение	Потеря точности
МСУЛ-РПМ, РПДА-Г		Не фиксируется общий ток локомотива, из-за чего не всегда можно точно установить значение потребленной локомотивом электроэнергии	Отсутствие сведений о работе ЭПС
	Непостоянная частота фиксации параметров	Время между соседними записями для МСУЛ-РПМ может достигать нескольких минут, для РПДА-Г – нескольких секунд. Возможны множественные измерения в течение одной секунды	Потеря точности
	Квантование напряжения	Значение напряжения на токоприемнике фиксируется с шагом в 40 В	Потеря точности
	Недостаточно детальная документация	Исходные коды ПО, описание алгоритмов, форматов данных закрыты, значительный объем существенных сведений не отражен в документации	Высокие трудозатраты на освоение ПО. Сложность интерпретации данных
	Несовершенство ПО для экспорта данных с картриджа	Трудоемкость проведения экспорта и ограниченные возможности пользователя в настройке перечня и формата выходных данных приводят к отсутствию необходимой информации в экспортируемых данных	Отсутствие сведений о работе ЭПС.
			Недоступность для анализа существенного объема данных
АСКУЭ, ГИД, МСУЛ-РПМ, РПДА-	Отсутствие привязки к глобальному времени	Возможно рассогласование данных из различных источников	Потеря точности

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Далее была сформирована матрица, содержащая наблюдения о проследовании исследуемых МПЗ, описываемые следующими наборами признаков:

- номинальные: номера поезда и локомотива, табельный номер машиниста и т. д.;
- постоянные для всей поездки количественные: масса состава, число осей и т. д.;
- изменяющиеся во времени количественные: ток и напряжение на токоприемнике, позиция, давление в тормозном цилиндре, токи и напряжения на фидерах подстанций и т. д.

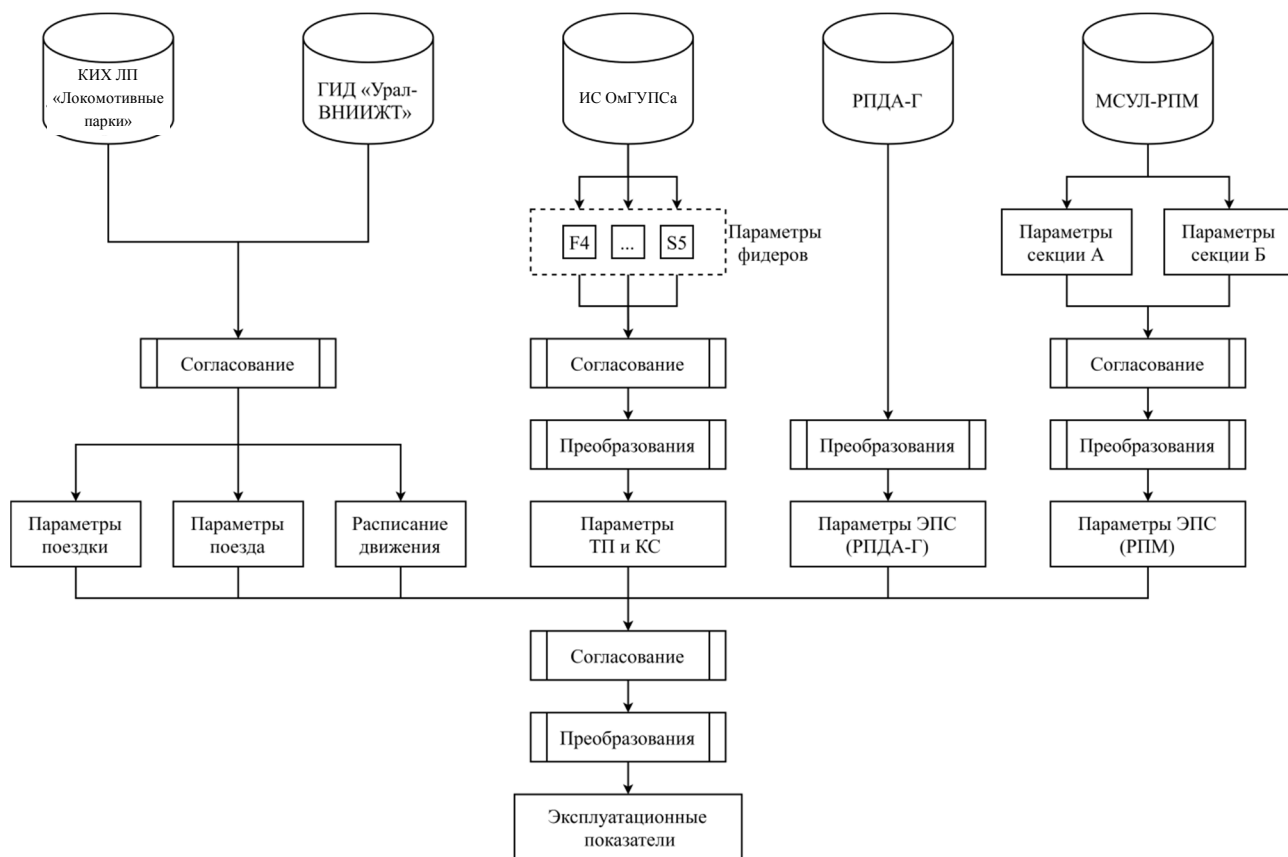


Рисунок 2 – Общая схема процесса определения эксплуатационных показателей по фактическим данным

На основе полученного признакового описания были определены ряд ключевых параметров ЭПС и устройств электроснабжения, часть из которых представлена в таблице 2, и построены графики синхронных измерений параметров ТП и ЭПС, пример которых представлен на рисунке 3.

Таблица 2 – Ключевые параметры эксплуатации электроподвижного состава и устройств тягового электро-снабжения

Наименование параметра	Значение параметра							
Серия локомотива	145-2ЭС6							
МПЗ (Ф – Фадино, Н – Новоселецк, С – Стрела)	Ф-Н	Ф-Н	Ф-Н	Н-С	Ф-Н	Н-С	Н-С	Н-С
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Дата поездки	26.06.20	28.05.20	26.05.20	26.05.20	28.05.20	28.05.20	29.05.20	10.05.20
Номер поезда	9444	2412	9454	9454	9414	9414	2520	2448
Номер локомотива	448	515	347	347	427	427	505	490
Табельный номер машиниста	10350	8224	2180	2180	4107	4107	2489	2913
Масса состава, т	2462	1686	2845	2845	2306	2306	2160	1703
Количество вагонов	103	71	70	70	96	96	90	71
Количество осей в составе поезда	412	284	280	280	384	384	360	284
Нагрузка на ось, т	5,98	5,94	10,16	10,16	6,01	6,01	6,00	6,00
Длина пути движения по МПЗ	15,54	15,71	15,69	15,77	15,66	15,90	16,04	16,07
Время движения по МПЗ	00:12:04	00:12:40	00:12:16	00:12:18	00:12:34	00:12:29	00:12:31	00:12:21

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Работа, 10^4 ткм	3,83	2,65	4,46	4,49	3,61	3,67	3,46	2,74
Участковая скорость, км/ч	77,26	74,43	76,73	76,94	74,78	76,41	76,88	78,05
Отпущенная в МПЗ электроэнергия, кВт·ч	553,54	420,04	424,49	395,36	531,39	521,41	474,72	411,14
Полный расход электроэнергии ЭПС, кВт·ч	600,58	469,63	431,66	402,38	562,32	537,70	509,09	436,06
Расход электроэнергии ЭПС без учета собственных нужд, кВт·ч	553,04	419,73	383,33	353,92	512,81	488,52	459,78	387,40
Потери электроэнергии в тяговой сети, кВт·ч	-47,04	-49,59	-7,18	-7,03	-30,93	-16,29	-34,37	-24,91
Удельный расход электроэнергии ЭПС, кВт·ч/ 10^4 ткм	157,01	177,28	96,73	89,67	155,70	146,68	146,96	159,38
Доля потерь электроэнергии в тяговой сети	-8,50%	-11,81%	-1,69%	-1,78%	-5,82%	-3,12%	-7,24%	-6,06%

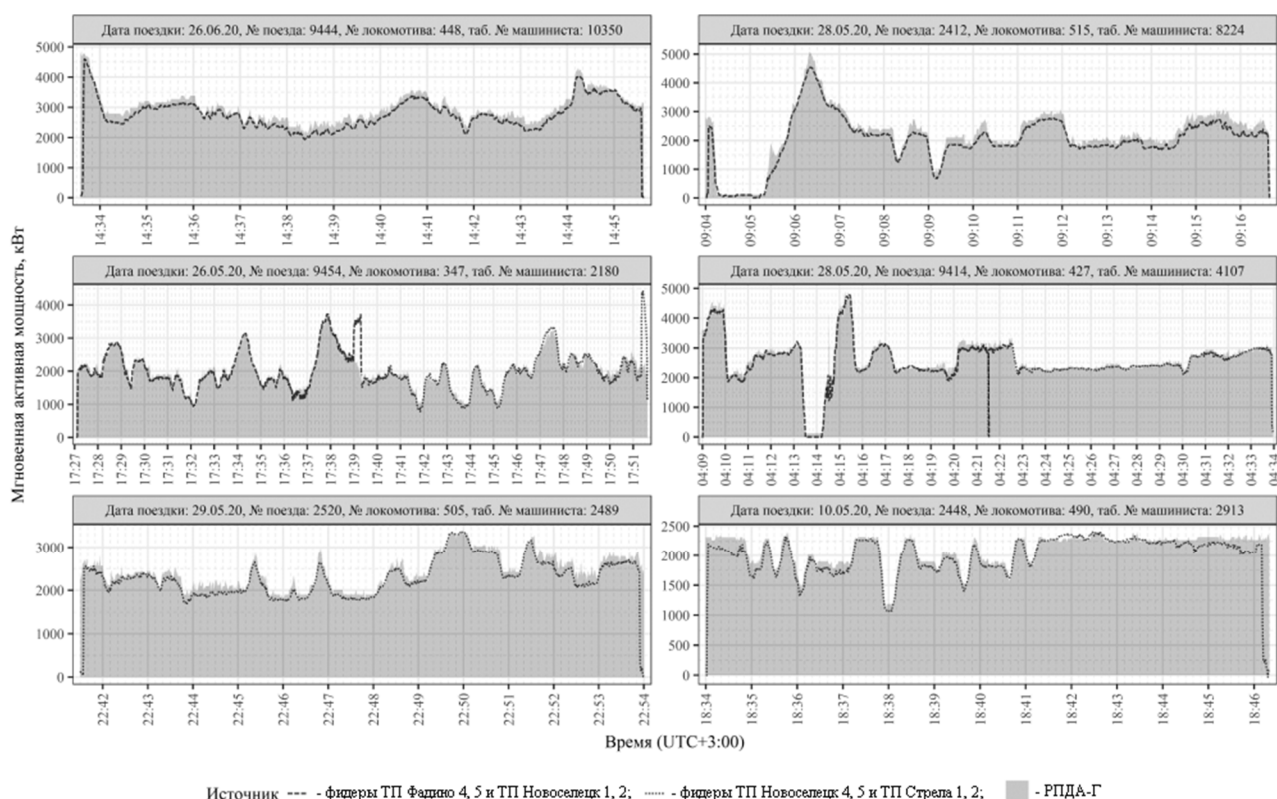


Рисунок 3 – Синхронные измерения параметров ТП и ЭПС

Несмотря на почти полное совпадение форм кривых мгновенных мощностей, значение полного расхода электроэнергии в границах МПЗ по данным РПДА-Г в большинстве случаев превышает значение отпущенной в МПЗ электроэнергии по данным счетчиков на фидерах контактной сети, что приводит к получению отрицательных значений потерь. Данное обстоятельство усугубляется тем, то ИС ОмГУПСа в редких случаях завышают значения энергий по фидерам контактной сети, но даже при уменьшении значения отпущенной в МПЗ электроэнергии на максимальную известную ошибку (1,4 %) значение потерь остается отрицательным. Более того, часто значение потерь остается отрицательным даже при применении описанной выше корректировки совместно с исключением из расчетов расхода электроэнергии на собственные нужды. Внесение данной погрешности применением линейной интерполяции исключается по причине превышения большинством мгновенных значений токов и энергий ЭПС соответствующих значений по фидерам контактной сети. Названные обстоя-

тельства, по мнению автора, свидетельствуют о завышенных относительно действительных значениях полного расхода электроэнергии по данным РПДА-Г. Возникновение данного завышения, вероятно, вызвано недостаточно высоким качеством данных от системы РПДА-Г, которое может быть обусловлено широким спектром причин: от аппаратных ограничений МПСУиД до влияния недокументированных особенностей ПО или форматов данных. К сожалению, точному установлению первопричины препятствуют ряд описанных в таблице 1 недостатков.

Проведенный эксперимент подтверждает возможности организации стыковки сведений с различных автоматизированных систем ОАО «РЖД» и измерительных систем ОмГУПС и определения по полученным данным фактических значений широкого спектра эксплуатационных показателей.

К сожалению, актуальное состояние автоматизированных систем ОАО «РЖД» не позволяет реализовать предикативное управление режимами работы электроподвижного состава и энергетической инфраструктуры железных дорог в изменяющихся условиях перевозочного процесса по причине наличия большого числа несовершенств в эксплуатируемых системах и существующих процессах, основные из которых были приведены в таблице 1. Тем не менее большинство названных недостатков может быть устранено путем фиксации требований к эксплуатируемым системам в открытом и едином для ОАО «РЖД» стандарте, аналогичном, например, группе стандартов IEC 61375. Подобный стандарт исключит принципиальные различия между решениями различных производителей, повысит совместимость оборудования, данных и ПО, увеличит доступность и полноту документации и, как следствие, снизит накладные расходы на разработку и внедрение новых технических решений, расширит возможности научного сообщества в проведении изысканий с целью выработки методов повышения эффективности работы холдинга.

В качестве развития приведенного в статье направления исследований предлагается произвести сравнение значений полного расхода электроэнергии на поездку, указанных в «Расходе ТЭР по машинистам» системы КИХ ЛП «Локомотивные парки» и вычисленных по данным РПДА-Г с целью установления степени их соответствия и возможности использования данных РПДА-Г для проверки корректности отчетных значений.

Кроме того, требуется дальнейшая проработка методов предсказания эксплуатационных показателей по фактическим данным и способов предикативного управления инфраструктурой железных дорог, в частности, методов поиска оптимальных состояний подсистем в динамически изменяющихся условиях перевозочного процесса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90140.

Список литературы

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» № 466р. Утв. Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2018 / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2019. – 135 с. – Текст : непосредственный.
2. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года № 466р. Утв. Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2018 / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2018. – 19 с. – Текст : непосредственный.
3. Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога» № 1285р. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 05.12.2017. – Москва : ОАО «РЖД», 2017. – 92 с. – Текст : непосредственный.
4. Истомин, С. Г. Оценка составляющих потерь электроэнергии электроподвижным составом и устройствами электроснабжения / С. Г. Истомин, А. Е. Перестенко. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 387 – 396. – DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-387-396.

5. Этапы реализации автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, Д. В. Пашков, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 3. – С. 45 – 49.
6. Черемисин, В. Т. Автоматизированный мониторинг энергетической эффективности работы электроподвижного состава ОАО «РЖД» / В. Т. Черемисин, Д. В. Пашков, С. Ю. Ушаков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 3 (19). – С. 87 – 91.
7. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности электроподвижного состава в границах зон учета электроэнергии железной дороги : научная монография / В. Т. Черемисин, С. Г. Истомин, С. Ю. Ушаков. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – 166 с. – Текст : непосредственный.
8. V. Cheremisin, S. Istomin, A. Perestenko Artificial intelligence methods to control the energy efficiency of electric rolling stock online, *E3S Web of Conferences* 175, 05046 (2020) DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505046>.
9. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2019614280 РФ. Энергоконтроль ЭПС / Истомин С. Г., Перестенко А. Е., Доманов К. И.; заявитель и правообладатель Омский государственный университет путей сообщения. – № 2019612944; заявлено 21.03.2019; опубликовано 02.04.2019. – 1 с.
10. Перестенко, А. Е. Информационная модель межподстанционной зоны при внедрении комплексной системы учета электропотребления на тягу поездов / А. Е. Перестенко. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2017. – С. 122 – 128.
11. Истомин, С. Г. Систематизация технических возможностей современных регистраторов параметров движения электроподвижного состава постоянного тока / С. Г. Истомин, А. Е. Перестенко. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы пятой всерос. науч.-техн. конфе с междунар. участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – С. 257 – 261.
12. Перестенко, А. Е. Разработка цифровой модели интеллектуального управления взаимодействием электроподвижного состава и инфраструктуры железных дорог / А. Е. Перестенко, С. Г. Истомин. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 145 – 150.

References

1. *Dolgosrochnaja programma razvitija otkrytogo akcionernogo obshhestva «Rossijskie zheleznye dorogi» № 466r* (Long-term development program of the open joint-stock company "Russian Railways" No. 466r). Moscow, Government of the Russian Federation, 2019, 135 p.
2. *O nacional'nyh celjah i strategicheskikh zadachah razvitija Rossijskoj Federacii na period do 2024 goda № 466r* (On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024 № 466r). Moscow, President of Russian Federation, 2018, 19 p.
3. *Koncepcija realizacii kompleksnogo nauchno-tehnicheskogo proekta «Cifrovaja zheleznaia doroga» № 1285r* (Concept for the implementation of the complex scientific and technical project «Digital Railway» no. 1285r). Moscow, JSC «Russian Railways», 2017, 92 p.
4. Istomin S. G., Perestenko A. E. Assessment of the electric power loss components by the electric stock and electric power supply facilities [Ocenka sostavljajushhih poter' jelektroenergii jelektropodvizhnyh sostavom i ustroystvami jelektrosnabzhenija]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija – Proceedings of Petersburg Transport University*, vol. 17, no. 3, pp. 387 – 396.
5. Cheremisin V. T., Ushakov S. Yu., Pashkov D. V., Nikiforov M. M. Stages of implementation of the automated system of monitoring the efficiency of the transportation process [Jetapy real-

izacii avtomatizirovannoj sistemy monitoringa jenergojeffektivnosti perevozochnogo processa]. *Zheleznodorozhny transport – Railway Transport*, 2015, no. 3, pp. 45 – 49.

6. Cheremisin V. T., Pashkov D. V., Ushakov S. Yu. Automated monitoring of energy efficiency operation of the electric rolling stock of JSC «Russian Railways» [Avtomatizirovannyj monitoring jenergeticheskoj jeffektivnosti raboty jelektropodvizhnogo sostava OAO «RZhD»]. *Izvestia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 3, pp. 87 – 91.

7. Cheremisin V. T., Istomin S. G., Ushakov S. Yu. Povyshenie jenergeticheskoj jeffektivnosti jelektropodvizhnogo sostava v granicah zon ucheta jelektroenergii zheleznoj dorogi: nauchnaia monografiia (Energy efficiency of the electric rolling stock in the borders of the electricity accounting areas of railways: scientific monograph). Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2019, 166 p.

8. V. Cheremisin, S. Istomin, A. Perestenko Artificial intelligence methods to control the energy efficiency of electric rolling stock online, *E3S Web of Conferences* 175, 05046 (2020) DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505046>.

9. Istomin S. G., Perestenko A. E., Domanov K. I. Software patent RU 2019614280, 02.04.19.

10. Perestenko A. E. Intersubstation zone information model for complete energy consumption measuring system for train traction [Informacionnaja model' mezhpodstancionnoj zony pri vnedrenii kompleksnoj sistemy ucheta jelektropotreblenija na tjagu poezdov]. *Innovacionnye proekty i tehnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchnoj konferencii* (Innovative projects and technologies in education, industry and transport: materials of the scientific conference). – Omsk, 2017, pp. 122 – 128.

11. Istomin S. G., Perestenko A. E. Systematization of technical possibilities of modern recorders of parameters of motion of DC electric moving composition [Sistematizacija tehniceskikh vozmozhnostej sovremennyh registratorov parametrov dvizhenija jelektropodvizhnogo sostava postojannogo toka]. *Tehnologicheskoe obespechenie remonta i povysenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: materialy vs Rossijskoj nauchno-tehnicheskoi konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* (Technological support of repair and improvement of dynamic qualities of railway rolling stock: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation). – Omsk, 2019, pp. 257 – 261.

12. Perestenko A. E., Istomin S. G. Development of the digital model of intellectual control of interaction of electric-motion composition and infrastructure of railways [Razrabotka cifrovoj modeli intellektual'nogo upravlenija vzaimodejstviem jelektropodvizhnogo sostava i infrastruktury zheleznyh dorog]. *Innovacionnye proekty i tehnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchnoj konferencii* (Innovative projects and technologies in education, industry, and transport: Proceedings of the scientific conference). – Omsk, 2020, pp. 145 – 150.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Перестенко Артем Евгеньевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: art-perestenko@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Перестенко, А. Е. Контроль эксплуатационных показателей электроподвижного состава и устройств электрооборудования с применением технологий обработки больших данных / А. Е. Перестенко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 66 – 75.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Perestenko Artem Evgenievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Rolling stock of electric railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: art-perestenko@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Perestenko A. E. A monitoring of performance indicators of electric rolling stock and power supply devices using big data processing technologies. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 3 (43), pp. 66 – 75 (In Russian).

В. С. Коссов, А. А. Лунин, С. В. Чунин

Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (АО «ВНИКТИ»),
г. Коломна, Российская Федерация

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ РЕЛЬСА

Аннотация. В данной статье рассмотрена проблема оценки устойчивости бесстыкового пути при его температурном удлинении. Проанализирован разработанный специалистами АО «ВНИКТИ» способ определения напряженно-деформированного состояния различных упругих объектов на примере рельса бесстыкового участка пути. Суть указанного способа заключается в определении зависимости собственных частот колебаний рельса от приложенного продольного усилия. В качестве средства получения такой зависимости был выбран модальный анализ модели участка пути, произведенный с использованием метода конечных элементов. В статье изложена методика проведения расчетов собственных частот колебаний рельса, представлены описание созданной модели участка пути и ее свойства, определены контактные взаимодействия элементов модели и граничные условия. Выполнены расчеты по определению собственных частот и форм колебаний рельса, показаны первые четыре формы колебаний рельса, полученных расчетным и экспериментальным способами. Проведена оценка адекватности созданной модели участка пути посредством сравнения собственных частот и форм колебаний рельса, полученных расчетом, методами модального анализа и экспериментально при измерении колебаний на натурном объекте – рельсоопорной решетке, имеющей аналогичную модели конструкцию. В качестве критерия, позволяющего сравнивать полученные формы собственных колебаний рельса, было решено использовать расстояние между узлами колебаний. Для дальнейшего исследования выбрана первая форма колебаний. С применением созданной модели участка пути проведены расчеты и получена зависимость собственной частоты первой формы колебаний рельса от приложенного к нему продольного усилия. Полученная зависимость может быть использована в предложенном специалистами АО «ВНИКТИ» способе с целью определения действующего продольного усилия в рельсах на натурном участке бесстыкового пути.

Ключевые слова: устойчивость, бесстыковой путь, собственные частоты, формы колебаний, продольное усилие, расчеты, модель участка пути.

Valery S. Kossov, Andrey A. Lunin, Sergey V. Chunin

Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock (JSC «VNIKTI»),
Kolomna, the Russian Federation

CALCULATED STUDY OF NATURAL FREQUENCIES AND MODES OF RAIL VIBRATIONS

Abstract. The problem of the assessment of the continuous welded rail track stability at its thermal elongation is considered in this paper. The method for determining the stress-strain state of various elastic objects developed by the specialists of JSC “VNIKTI” is analyzed on the example of a rail of a continuous-welded track section. The essence of the method is to determine the dependence of the natural frequencies of rail vibrations on the applied longitudinal force. As a means of obtaining such a dependence, a modal analysis of a track section model carried out using the finite element method was chosen. The methodology for calculating the natural frequencies of rail vibrations and the description of the created model of the track section and its properties are presented in the paper, the contact interactions of the model elements and boundary conditions are defined in it. Calculations for determining the natural frequencies and modes of rail vibrations are performed, the first four modes of rail vibrations obtained by calculation and experimental methods are shown. The assessment of the adequacy of the created model of the track section is carried out by comparing the natural frequencies and modes of rail vibrations obtained by calculation, by modal analysis methods and experimentally when measuring vibrations on a full-scale object – assembled rails and sleepers, having a similar design compared with the model. It was decided to use the distance between the vibration nodes as a criterion for comparing the obtained modes of natural rail vibrations. The first mode of vibration is selected for further studies. Calculations were carried out and the dependence of the natural frequency of the first vibration mode of the rail on the longitudinal force applied to it was obtained using the created model of the track section. The obtained dependence can be used in the method proposed by the specialists of JSC “VNIKTI” in order to determine longitudinal force, applied to the rails on the full-scale section of the continuous welded rail track.

Keywords: stability, continuous welded rail track, natural frequencies, modes of vibrations, longitudinal force, calculation, track section model.

В настоящее время большое распространение на железных дорогах мира получил бесстыковой путь, который имеет множество преимуществ по сравнению со звеньевым. Однако такая конструкция пути не лишена недостатков, одним из которых является сложность контроля продольных сил сжатия в рельсе в процессе его температурного удлинения. Указанные силы возникают из-за ограничения возможности теплового расширения (сжатия) со стороны окружающих частей рельсового пути.

Для того чтобы понять, как работает бесстыковой путь, необходимо представить рельсовую плетвь в свободном состоянии. Нагрев или охлаждение плетви в свободном состоянии будет вызывать ее равномерное удлинение или укорочение. При укладке рельсов в путь и охлаждении или нагревании плетвь стремится изменить свою длину, но ей мешают скрепления. В бесстыковом пути удлинения и укорочения плетей происходят только на конечных участках, эти концевые участки называют «дышащими» (плетви «дышат» за счет зазоров в уравнильных пролетах).

Таким образом, в работе бесстыкового пути, а точнее в работе плетви бесстыкового пути перемещаются только концевые дышащие участки. Перемещения затухают в направлении от концов плетви к середине и далее на большей части плетви перемещения отсутствуют. С учетом этого в рельсах бесстыкового пути могут образовываться значительные продольные усилия сжатия или растяжения.

Эксплуатация пути, продольные силы сжатия рельсов которого превышают допустимое значение, может привести к выбросу пути и сходу подвижного состава с рельсов.

В настоящее время на железных дорогах России контроль безопасного уровня продольных усилий сжатия в рельсах производится косвенным методом путем отслеживания подвижек меток, нанесенных на рельс относительно так называемых «маячных» (неподвижных) шпал [1]. Указанный метод имеет множество недостатков, в том числе низкую точность и скорость оценки напряженного состояния рельсов, а также невозможность выполнения контроля продольных сил рельсов на всем протяжении пути.

В целях повышения безопасности движения и исключения недостатков применяемого метода в АО «ВНИКТИ» был разработан способ определения напряженно-деформированного состояния различных упругих объектов, который может применяться в том числе и к рельсам [2]. Сущность этого способа состоит в определении расчетным методом зависимости изменения частоты собственных колебаний объекта (в нашем случае – рельса) от приложенного к нему продольного усилия. Затем измеряются температура и собственная частота колебаний рельса на участке бесстыкового пути железной дороги и по указанной выше зависимости определяется значение продольной силы в рельсе.

Рассмотрим один из способов получения зависимости собственной частоты колебаний рельса от приложенной к нему продольной силы на основе модального анализа методом конечных элементов модели участка пути в программном комплексе Ansys.

Модальный анализ – это исследование динамических свойств линейных структур на базе структурного тестирования или численного моделирования методом конечных элементов. К таким динамическим свойствам относятся резонансные частоты (собственные частоты) и структурная форма (собственный тип колебаний). Динамические свойства зависят от распределения массы, жесткости и демпфирования на структуре и определяют поведение структурных колебаний при воздействии эксплуатационных нагрузок. Каждая деформация линейной структурной системы может быть выражена как линейная комбинация структурных форм, которые образуют ортонормированную векторную базу.

Для решения поставленной задачи необходимо выполнить следующие этапы:

- создать конечно-элементную модель участка пути;
- определить контактные взаимодействия;
- определить граничные условия (силы, крепления);
- провести модальный расчет по модели участка пути при различных продольных силах, приложенных к рельсу, с использованием программного продукта Ansys, который поз-

воляет определить частоты и формы собственных колебаний, а также расстояния между узлами колебаний. Зная эти расстояния, можно проводить сравнение форм колебаний и выполнять проверку их адекватности;

- выполнить анализ результатов.

Построение модели ничем не отличается от построения модели для других видов анализа. Однако подчеркнем некоторые особенности:

как уже говорилось выше, в модальном анализе рассматриваются только линейные модели, нелинейные свойства (нелинейная упругость, пластичность, ползучесть) игнорируются. Например, если в модель включены контактные элементы, их жесткость вычисляется на основе начального статуса и далее в процессе решения не меняется;

свойства материала также должны быть линейными, изотропными или ортотропными, постоянными или зависящими от температуры. Необходимо определить как жесткостные (модули упругости), так и массовые (плотность) свойства сред характеристики материала.

Если в модели присутствует диссипация, должны быть определены диссипативные (демпфирующие) свойства материалов и элементов.

Для оценки эффективности выбранного метода расчета собственных частот и форм колебаний была создана компьютерная модель участка пути (рисунки 1 и 2). Основными техническими данными модели участка пути являются следующие:

- шпала Ш1 – ГОСТ 10629-88 [3] – 10 шт., эпюра шпал: 1840 шт./км;
- подкладка КБ65 – ГОСТ 16277-93 [4];
- прокладки ЦП-328 и ЦП-143-1 – ГОСТ Р 56291-2014 [5];
- рельс Р65 – ГОСТ 51685-2013 [6].

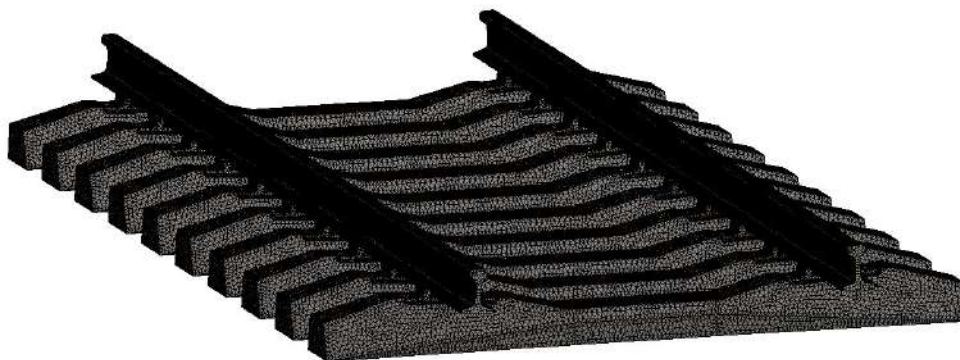


Рисунок 1 – Модель участка пути

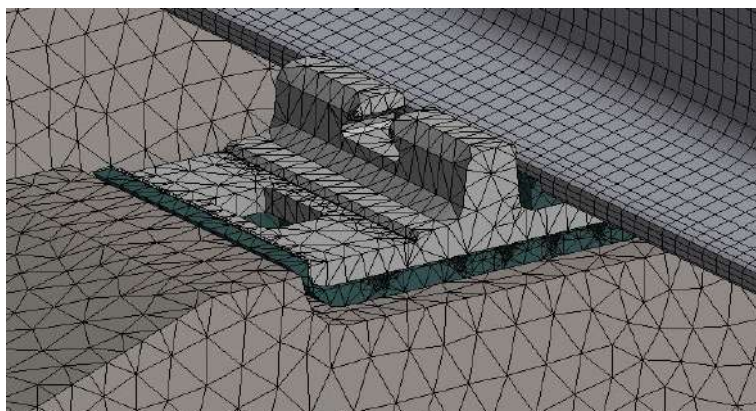


Рисунок 2 – Узел скрепления модели участка пути

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Все элементы участка пути смоделированы как упругие тела, для которых по технической документации [3 – 8] были определены упругие характеристики их материала, которые приведены в таблице 1. Модель включает в себя 1 138 200 элементов и 506 086 узлов.

Контактное взаимодействие двух тел в Ansys моделируется несколькими видами контактов:

Bonded: связанный контакт, зазор между телами автоматически закрывается, проникновение игнорируется, т. е. тела накрепко сцеплены друг с другом (аналог – склеенные детали);

No separation: линейный контакт без разделения, иными словами, как и в Bonded, не допускается любое разделение контактных поверхностей в направлении нормали, однако допускается небольшое относительное скольжение между ними с нулевым трением;

Frictionless: нелинейный контакт без трения, зазор и проникновение регулируются;

Frictional: нелинейный контакт с учетом трения;

Rough: жесткий грубый контакт при возможном разделении тел в ходе контакта (контакт без скольжения, трение равно бесконечности).

В нашем случае взаимодействие шпал, прокладок и подкладок моделируется при помощи связанного контакта Bonded, который ограничивает относительное перемещение между деталями.

Взаимодействие между рельсом и прокладкой ЦП-143-1 моделируется с помощью контакта No separation.

Закрепление модели производилось через подошву всех шпал.

Таблица 1 – Упругие характеристики материалов элементов модели участка пути

Элемент	Материал	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
Шпала Ш1	Тяжелый бетон класса В40 – ГОСТ 26633-2015 [7]	32	0,15
Подкладка КБ65	Ст4кп – ГОСТ 380-2015 [8]	210	0,26
Прокладки ЦП-328 и ЦП-143-1	Резина [9]	0,9	0,5
Рельс Р65	Сталь К76Ф – ГОСТ Р 51685-2013 [6]	210	0,26

Модальный расчет частот и форм собственных колебаний был выполнен с помощью метода определения собственных частот и форм колебаний пакета Ansys, основанного на применении метода конечных элементов и дискретных уравнений движения, которые в матричном виде можно представить так:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}, \quad (1)$$

где $[M]$, $[C]$ и $[K]$ – матрицы масс, демпфирования и жесткости соответственно;

$\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$ и $\{u\}$ – векторы узловых ускорений, скоростей и перемещений;

$\{F\}$ – вектор эквивалентных узловых перемещений.

Уравнение свободных колебаний конструкции в матричной форме имеет вид:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}. \quad (2)$$

Однако для расчета предварительно напряженных конструкций матрицу жесткости $[K]$ представляют в виде суммы обычной матрицы жесткости $[K]$ и $[K]g$ – геометрической матрицы жесткости, которая получается на основе тензора предварительных напряжений и нелинейной части тензора деформации. В пакете Ansys результаты расчета статической задачи (расчет напряженно-деформированного состояния) передаются в исходные данные модального расчета.

Результаты произведенного модального анализа при нулевом значении продольного усилия в виде различных форм колебаний представлены на рисунках 3 – 6.

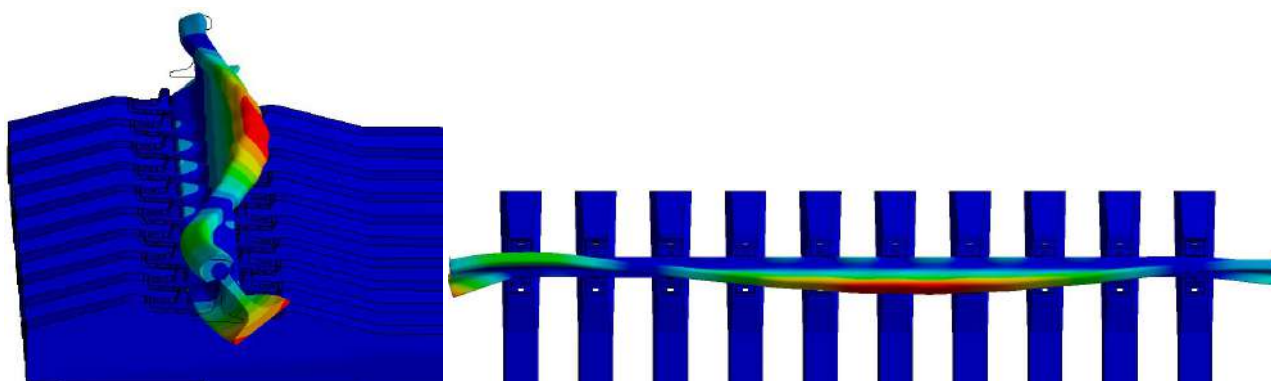


Рисунок 3 – Первая форма собственных колебаний рельса

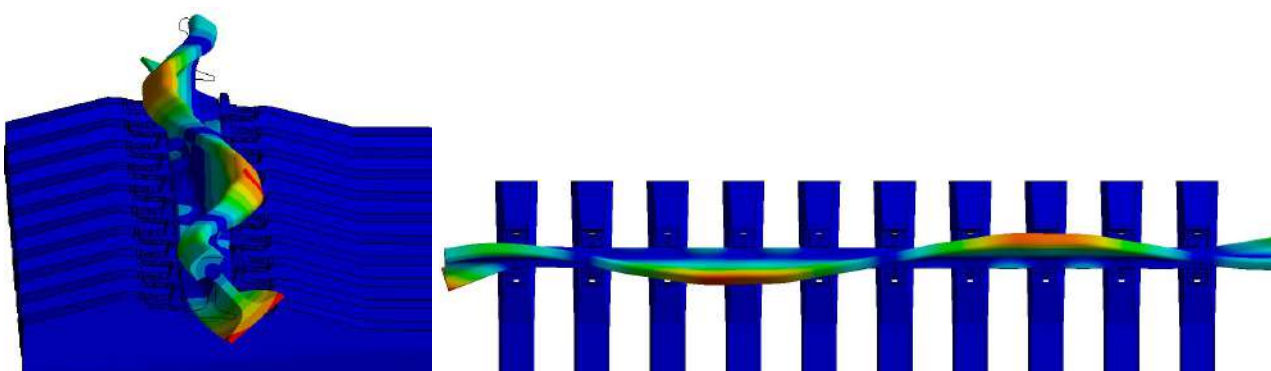


Рисунок 4 – Вторая форма собственных колебаний рельса

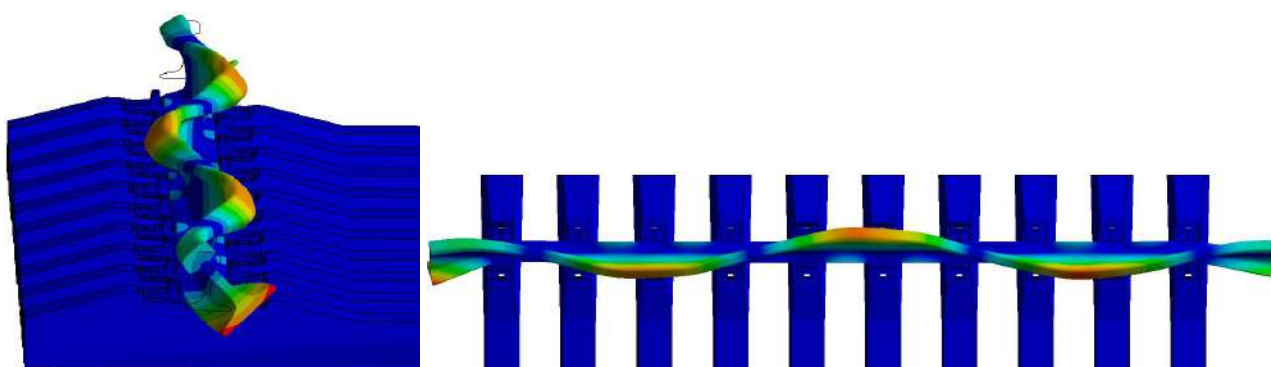


Рисунок 5 – Третья форма собственных колебаний рельса

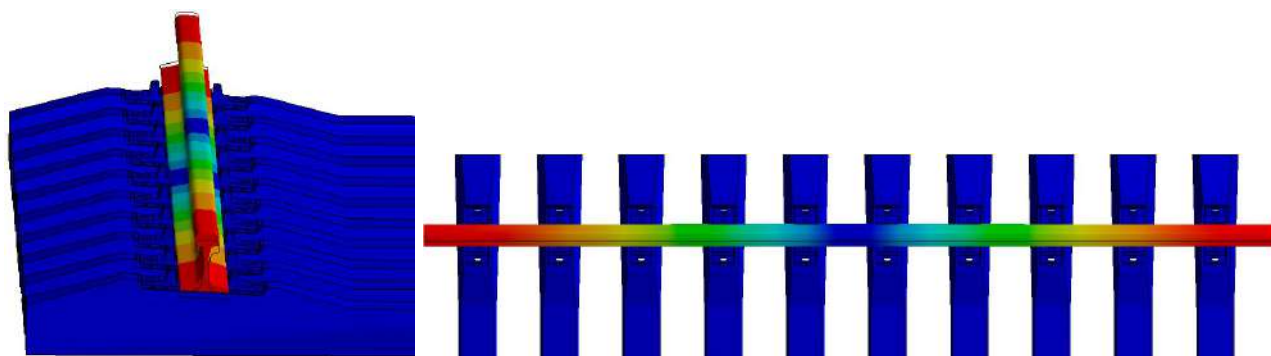


Рисунок 6 – Четвертая форма собственных колебаний рельса

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Для полученных первых трех форм собственных колебаний рельса характерны наибольшие перемещения головки рельса в поперечном направлении, а также изгибные деформации шейки рельса. Четвертая форма собственных колебаний рельса характеризуется продольными деформациями рельса.

Отметим также, что полученные первые три формы колебаний рельса можно однозначно различить и идентифицировать по расстоянию между узлами колебаний, т. е. по расстоянию между точками на рельсе, в которых не происходят поперечные колебания. Результаты определения таких расстояний и значение собственных частот колебаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения частоты собственных колебаний рельса, полученные расчетом

Номер формы колебаний	Частота колебаний, Гц	Расстояние между узлами колебаний, мм
1	152	4109
2	248	2211
3	315	1602
4	580	–

Для оценки достоверности полученных результатов и верификации созданной модели участка пути было выполнено сравнение результатов расчетов с результатами экспериментов на натурном объекте. Таким объектом является рельсошпальная решетка, собранная на девяти железобетонных шпалах из рельсов Р65 и креплений КБ65, которая была расположена в цеху прочности АО «ВНИКТИ».

Измерения собственных колебаний проводились с использованием вибропреобразователей, которые крепились магнитами на головку рельса в поперечном направлении над каждой шпалой (9 шт.). Возбуждение колебаний рельса производилось путем нанесения поперечного удара молотком по головке рельса в среднем сечении. Регистрация затухающих колебаний производилась одновременно всеми вибропреобразователями.

С помощью процедуры быстрого преобразования Фурье [10] был получен график спектра виброускорений головки рельса в поперечном направлении (рисунок 7) [11]. Этот спектр показывает, что наиболее выраженные пики виброускорений приходятся на частоты 144, 277, 315 и 575 Гц, которые практически соответствуют расчетным значениям, приведенным в таблице 2.

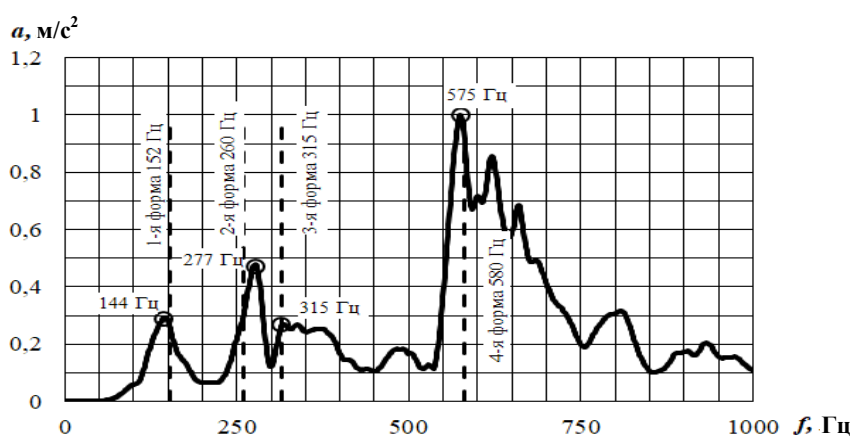


Рисунок 7 – График экспериментального спектра виброускорений собственных колебаний головки рельса в поперечном направлении

Далее было выполнено сравнение частот собственных колебаний, полученных в результате расчета и эксперимента. По «пикам» на спектре собственных колебаний (см. рисунок 7) невозможно однозначно сделать вывод о порядке или форме собственных колебаний рельса. Поэтому формы собственных колебаний определялись на основе расчета расстояния между

узлами колебаний (точками на рельсе, в которых не происходит поперечного перемещения головки рельса в процессе собственных колебаний).

Для этого полученные данные фильтровались для узкой полосы частот от $f_{\phi} = \pm 1$ Гц, где f_{ϕ} – частота выбранной формы собственных колебаний рельса. Затем проводилась оценка фазы колебаний в каждом месте измерения, определялись расстояния между узлами колебаний и выполнялось их сравнение с расчетными значениями, приведенными в таблице 2. Результаты этих процедур (рисунок 8 и таблица 3) показывают следующее:

первая и вторая формы колебаний подобны, так как имеют одинаковое количество узлов колебаний (соответственно два и три на длине выбранного участка пути), при этом первая форма колебаний имеет лучшую сходимость расчетных и экспериментальных данных для значений частоты колебаний и расстояний между узлами колебаний;

третью форму колебаний затруднительно однозначно определить на спектре виброускорений (см. рисунок 7), так как в необходимом диапазоне частот нет четко выраженного «пика». Поэтому для принятой частоты 315 Гц форма колебаний имеет различное количество узлов: четыре по расчетным данным и пять по экспериментальным, а также значительную разность по расстояниям между узлами колебаний;

четвертая форма колебаний, полученная экспериментально, имеет большое количество узлов колебаний (более десяти) и маленькое расстояние между узлами колебаний (307 мм), которое меньше расстояния между датчиками, при этом получается, что на расстоянии двух узлов колебаний (предположим, что это период колебаний) будет находиться от одного до двух датчиков, что в свою очередь согласно теореме Котельникова делает невозможным достоверно идентифицировать фазы колебаний головки рельса в местах между датчиками.

Анализ полученных результатов показал, что первая форма колебаний наиболее легко идентифицируется на спектре собственных колебаний рельса (см. рисунок 7), так как частота ее колебаний является низшей и представляет собой четко выраженный «пик» на спектре собственных колебаний. Кроме того, она имеет хорошую сходимость при определении ее частоты расчетным и экспериментальным способами, относительная разность между которыми составляет менее 6 %. Поэтому первая форма колебаний была выбрана в качестве исследуемой для определения зависимости изменения ее частоты от продольного усилия, приложенного к рельсу.

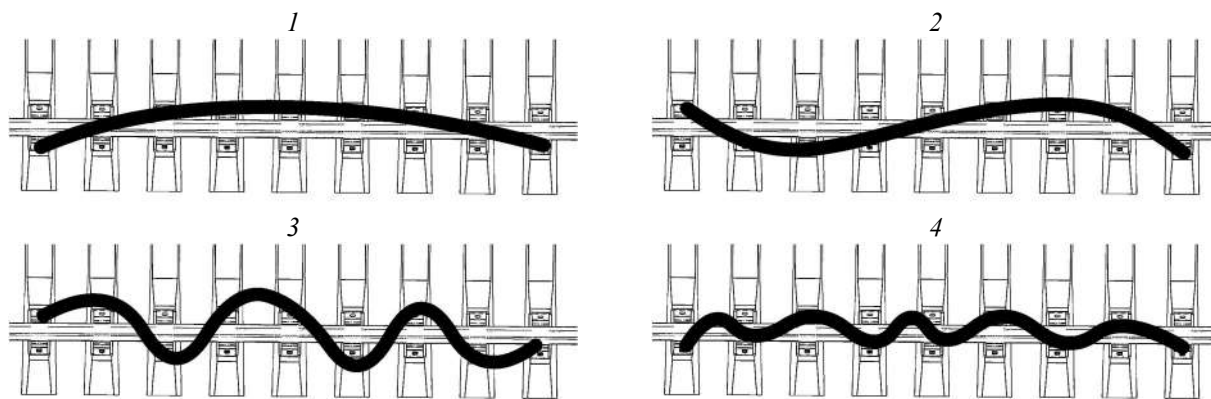


Рисунок 8 – Экспериментальные формы собственных колебаний головки рельса в поперечном направлении, полученные на рельсошпальной решетке: 1 – первая; 2 – вторая; 3 – третья; 4 – четвертая

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Таблица 3 – Сравнительная оценка полученных частот собственных колебаний головки рельса

Номер формы колебаний	Частота, Гц		Расстояние между узлами колебаний, мм		Относительная разность, %	
	рельсошпальная решетка	модель участка пути	рельсошпальная решетка	модель участка пути	частота	расстояние между узлами колебаний
1	144	152	3522	4109	5,6	16,7
2	277	248	1805	2211	10,5	22,5
3	315*	315	576*	1602	0,0*	–
4	575	580	307	–	0,9	–

* Значение определено неоднозначно, так как спектр собственных частот в этом интервале не имеет четко выраженного «пика» плотности мощности ускорения колебаний головки рельса

Расчеты выполнялись путем проведения модального анализа на построенной модели участка пути для первой формы собственных колебаний рельса при различных приложенных к рельсу продольных силах.

Для моделирования сил, возникающих в рельсах при их тепловом удлинении в условиях бесстыкового пути, в созданную ранее модель участка пути были добавлены соответствующие силы, равномерно распределенные по площади сечения рельса. Приложение этих сил осуществлялось симметрично с двух концов рельса.

Величины продольных сил изменяли ступенчато, начиная с -200 кН (сжатие), заканчивая 200 кН (растяжение) с шагом 20 кН, при этом на каждой ступени нагрузки выполняли модальный анализ и определяли частоту первой формы собственных колебаний рельса.

Полученные результаты представлены в виде графика (рисунок 9) зависимости частоты первой формы колебаний рельса от продольных сил.

Анализ полученной зависимости показал, что при изменении величины продольных сил от 200 кН сжатия до 200 кН растяжения частота первой формы собственных колебаний рельса изменяется на 11 Гц, что является достаточным интервалом при измерении собственных частот на натурном объекте и определении действующего продольного усилия.

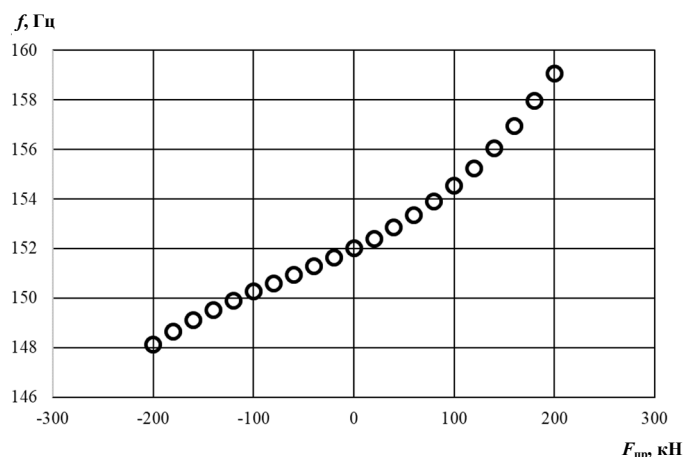


Рисунок 9 – Зависимость частоты первой формы колебаний рельса от продольных сил

Результаты выполненных расчетов собственных частот и форм колебаний рельса имеют удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность разработанной модели участка пути.

Полученная зависимость частоты первой формы собственных колебаний рельса от величины приложенного продольного усилия может использоваться в предложенном АО «ВНИКТИ» способе определения напряженно-деформированного состояния различных упругих объектов [2], который позволит определять действующее продольное усилие в рельсах на натурном участке бесстыкового пути.

Список литературы

1. Об утверждении и вводе в действие «Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути» : распоряжение ОАО «РЖД» № 2788р от 29.12.2012. <http://www.consultant.ru/> : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?from=548337-0&rnd=5CF1048883E8D18567833A186C76F968&req=doc&base=EXP&n=595576&REFDOC=548337&REFBASE=EXP#1762a9q3l9v> (дата обращения: 01.12.2020).
2. Патент № 2670723С9 Российская Федерация, МПК G01L1/00 (2006.01). Способ определения напряженно-деформированного состояния различных упругих объектов : № 2017144958 : заявлено 21.12.2017 ; опубликовано 15.11.2018 / Бидуля А. Л., Волохов Г. М., Овечников М. Н., Панин Ю. А., Пономарев А. С., Чунин С. В., Шабуневич В. И.; заявитель АО «ВНИКТИ». – 9 с.: ил. – Текст : непосредственный.
3. ГОСТ 10629-88. Шпалы железобетонные, предварительно напряженные для железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия. – Москва : Изд-во стандартов, 2004. – 15 с. – Текст : непосредственный.
4. ГОСТ 16277-93. Подкладки раздельного скрепления железнодорожных рельсов типов Р50, Р65 и Р75. Технические условия. – Москва : Стандартиформ, 2006. – 16 с. – Текст : непосредственный.
5. ГОСТ Р 56291-2014. Прокладки рельсовых скреплений железнодорожного пути. Технические условия (с поправкой). – Москва : Стандартиформ, 2015. – 31 с. – Текст : непосредственный.
6. ГОСТ Р 51685-2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (с изменением № 1). – Москва : Стандартиформ, 2014. – 101 с. – Текст : непосредственный.
7. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 15 с. – Текст : непосредственный.
8. ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки (с изменением № 1). – Москва : Стандартиформ, 2009. – 15 с. – Текст : непосредственный.
9. Скуба, И. А. Справочник резинщика. – Москва : Химия, 1971. – 608 с. – Текст : непосредственный.
10. Нуссбаумер, Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток. – Москва : Радио и связь, 1985. – 248 с. – Текст : непосредственный.
11. Чунин, С. В. Экспериментальное исследование собственных частот и форм колебаний рельса / С. В. Чунин, В. И. Шабуневич, А. Н. Савоськин. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2020. – Т. 79. – № 3. – С. 154 – 160.

References

1. *Ob utverzhdenii i vvode v dejstvie «Instrukcii po ustrojstvu, ukladke, soderzhaniju i remontu besстыkovogo puti»*: *rasporjazhenie* ОАО «RZhD» № 2788r от 29.12.2012 (On approval and putting into effect of «The arrangement, laying, maintenance and repair of a continuous welded track instructions»: JSC Russian Railways order no. 2788r dated December 29, 2012), Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?from=548337-0&rnd=5CF1048883E8D18567833A186C76F968&req=doc&base=EXP&n=595576&REFDOC=548337&REFBASE=EXP#1762a9q3l9v> (accessed 01 December 2020).
2. Bidulya A. L., Volokhov G. M., Ovechnikov M. N., Panin Yu. A., Ponomarev A. S., Chunin S. V., Shabunovich V. I. *Patent RU 2670723C9*, 15.11.2018.
3. *Shpaly zhelezobetonnye, predvaritel'no naprjazhennye dlja zheleznyh dorog kolei 1520 mm. Tehnicheskie uslovija. GOST 10629-88* (Reinforced concrete sleepers, prestressed for 1520 mm track gauge railways. Specifications, GOST 10629-88). Moscow: Publishing house of standards, 2004, 15 p.
4. *Podkladki razdel'nogo skreplenija zheleznodorozhnyh rel'sov tipov R50, R65 i R75. Tehnicheskie uslovija. GOST 16277-93* (Baseplates for separate fastening of P50, P65 and P75 types railway rails. Specifications, GOST 16277-93). Moscow: Standartinform, 2006, 16 p.

5. *Prokladki rel'sovyh skreplenij zheleznodorozhnogo puti. Tehnicheskie uslovija (s Popravkoj). GOST R 56291-2014* (Rail fastening space plates for railway tracks. Specifications (with Amendment), National Standard 56291-2014). Moscow: Standartinform, 2015, 31 p.

6. *Rel'sy zheleznodorozhnye. Obshhie tehnicheckie uslovija (s Izmeneniem № 1). GOST R 51685-2013* (Railroad rails. General specifications (with Amendment no. 1), National Standard 51685-2013). Moscow: Standartinform, 2014, 101 p.

7. *Betony tjazhelye i melkozernistyje. Tehnicheskie uslovija. GOST 26633-2015* (Heavy and fine-grained concrete. Specifications, GOST 26633-2015). Moscow: Standartinform, 2019, 15 p.

8. *Stal' uglerodistaja obyknovennogo kachestva. Marki (s Izmeneniem № 1), GOST 380-2005* (Carbon steel of ordinary quality. Stamps (with Amendment No. 1), GOST 380-2005). Moscow: Standartinform, 2009, 15 p.

9. Skuba I. A. *Spravochnik rezinshchika* (Handbook of the rubber-industry worker). Moscow: Chemistry Publ., 1971, 608 p.

10. Nussbaumer G. *Bystroe preobrazovanie Fur'e i algoritmy vychislenija svertok* (Fast Fourier transform and algorithms for calculating convolutions). Moscow: Radio and communication Publ., 1985, 248 p.

11. Chudin S. V., Shabunovich V. I., Savos'kin A. N. Experimental study of natural frequencies and forms of the rail oscillations [Eksperimental'noe issledovanie sobstvennyh chastot i form kolebanij rel'sa]. *Vestnik VNIIZhTa – VNIIZHT Scientific Journal*, 2020, vol. 79, no. 3, pp. 154 – 160.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коссов Валерий Семенович

Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, 140402, Московская область, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, генеральный директор АО «ВНИКТИ».

Тел.: 8(496)618-82-39.

E-mail: info@vnikti.com

Лунин Андрей Александрович

Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, 140402, Московская область, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе АО «ВНИКТИ».

Тел.: 8(496)618-05-99.

E-mail: lunin-aa@vnikti.com

Чунин Сергей Владимирович

Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, 140402, Московская область, Российская Федерация.

Заведующий лабораторией АО «ВНИКТИ».

Тел.: 8(496)618-82-48, доб. 13-36.

E-mail: chudin-sv@vnikti.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Коссов, В. С. Расчетное исследование собственных частот и форм колебаний рельса / В. С. Коссов, А. А. Лунин, С. В. Чунин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 76 – 85.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kossov Valery Semenovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabr'skoj revolyucii Street, Kolomna, 140402, Russia.

Doctor of Science in Engineering, Professor, Director General of JSC «VNIKTI».

Phone: 8(496)618-82-39.

E-mail: info@vnikti.com

Lunin Andrey Alexandrovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabr'skoj revolyucii Street, Kolomna, 140402, Russia.

Ph. D. in Engineering, Deputy Director General for Academic Affairs of JSC «VNIKTI».

Phone: 8(496)618-05-99.

E-mail: lunin-aa@vnikti.com

Chudin Sergey Vladimirovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabr'skoj revolyucii Street, Kolomna, 140402, Russia.

Head of Laboratory of JSC «VNIKTI».

Phone: 8(496)618-82-48, add. 13-36.

E-mail: chudin-sv@vnikti.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kossov V. S., Lunin A. A., Chudin S. V. Calculated study of natural frequencies and modes of rail vibrations. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 3 (43), pp. 76 – 85 (In Russian).

УДК 656.025.4

Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), г. Ростов-на-Дону,
Российская Федерация

К ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛА РАЗВИТИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО КОРИДОРА «СЕВЕР – ЮГ»

Аннотация. Глобализация мировых экономических процессов ставит задачи развития международных транспортных коридоров (МТК) и их участков в составе национальных транспортных систем. Тарифная политика и нормативно-правовое окружение перевозочного процесса формируют институциональные предпосылки и грузовую базу МТК, которые могут стать барьером или драйвером его развития.

Целью работы является оценка потенциала развития транспортного коридора и повышение привлекательности МТК за счет использования мультимодальных схем перевозки для привлечения грузопотоков (в том числе экспортных) со смежных направлений.

В статье приводятся анализ и развитие методов оценки перспективной грузовой базы транспортного коридора в условиях конкуренции предприятий видов транспорта с учетом конфигурации национальной транспортной сети. Представлена методика оценки грузовой базы в условиях мономодальных и мультимодальных перевозок на логистических принципах – сокращение временных и стоимостных параметров схемы организации перевозок.

Показаны возможности интегративного развития видов транспорта в зоне тяготения транспортного коридора за счет организации перевозок в мультимодальном сообщении. Географическое «транзитное» расположение Российской Федерации на евразийском континенте открывает широкие возможности для сближения экономик европейских и азиатских стран за счет развития МТК, пролегающих по нашей территории.

Рассматриваются перспективы развития МТК «Север – Юг», зависящие от геополитических и инфраструктурных (технологических) факторов. Технологический фактор связан с такими проблемами транспортной системы России, как загруженность инфраструктуры на подходах к портам Азово-Черноморского бассейна, железнодорожного хода Москва – Луховицы – Ростов-на-Дону – Краснодар и др., влияющими непосредственно на потенциал транспортного коридора. Представлена графическая схема основных железнодорожных и автомобильных сообщений МТК «Север – Юг» с расстояниями для проведения тарифных расчетов.

Ключевые слова: международный транспортный коридор, МТК «Север – Юг», грузовая база, грузовые, мультимодальные и контейнерные перевозки.

Enver A. Mamaev, Dmitry V. Sorokin

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, the Russian Federation

TO ASSESS THE DEVELOPMENT POTENTIAL OF THE «NORTH – SOUTH» INTERNATIONAL TRANSPORT CORRIDOR

Abstract. The globalization of world economic processes poses challenges for the international transport corridors (ITC) development and their sections as part of national transport systems. The tariff policy and regulatory environment of the transportation process form the institutional prerequisites and cargo base of the ITC, which can become a barrier or driver of its development.

The purpose of the work is assess the transport corridor development potential and increase the attractiveness of the ITC by using multimodal transportation schemes to attract cargo flows (including export) from related directions.

The paper provides an analysis and development of methods for assessing the prospective transport corridor cargo base in the conditions of competition between enterprises of transport modes, taking into account the national transport network configuration. The article presents a method for assessing the cargo base in the conditions of monomodal and multimodal transportation based on logistics principles-reducing the time and cost parameters of the transportation organization scheme.

The possibilities of transport modes integrative development are show in the zone of gravity of the transport corridor due to the transport in multimodal transport organization. The geographical Russian Federation «transit» location on the Eurasian continent opens up wide opportunities for the convergence of the European and Asian countries economies through the development of the ITC that runs through our territory.

The article considers the prospects for the ITC «North-South» development, which depend on geopolitical and infrastructural (technological) factors. The technological factor relate to such problems of the Russian transport system

as the congestion of infrastructure at the approaches to the ports of the Azov-black sea basin, the Moscow-Likhaya-Rostov-on-don-Krasnodar railway, etc., which directly affect the potential of the transport corridor. A graphical diagram present main railway and automobile communications of the ITC «North – South» and road network with distances for tariff calculations.

Keywords: international transport corridor, ITC «North – South», cargo base, freight transportation, multimodal transportation, container transportation.

Стратегические цели международных транспортных коридоров (МТК), включая МТК «Север – Юг», заключаются в сокращении экономического расстояния между регионами и странами, стимулируя рост мирового разделения труда и объединение рынков. Для Российской Федерации, как транзитного государства, МТК способствует развитию национальной транспортной системы, укреплению взаимовыгодного экономического сотрудничества между регионами, развитию мультимодальных перевозок [1, 2]. Инфраструктурные возможности российской транспортной системы позволяют осуществлять перевозку грузов внутри страны преимущественно тремя видами транспорта общего пользования: водным, автомобильным и железнодорожным. Несмотря на все преимущества перевозки грузов речным видом транспорта, такие как высокая провозная способность или низкая себестоимость перевозки, имеются существенные недостатки, которые не позволяют осуществлять конкурентоспособные транзитные перевозки по внутренним водным коммуникациям: высокая зависимость от навигационных и погодных условий, низкая географическая доступность водного транспорта для грузоотправителей, низкая скорость доставки грузов и др. Регулярность, ритмичность перевозок, необходимые для поддержания конкурентоспособности транспортного коридора, можно обеспечить железнодорожными, автомобильными или комбинированными перевозками [3, 4].

Актуальность темы исследования обуславливается необходимостью определения конкурентного баланса между перевозками автомобильным и железнодорожным видами транспорта, а также оценки привлекательности маршрутов МТК «Север – Юг» на основе реализации схемы мультимодальных перевозок [5]. Рассматриваются возможности организации мультимодальных и мультимодальных железнодорожно-автомобильных перевозок для увеличения грузовой базы транспортного коридора за счет расширения географии пунктов зарождения грузопотоков, тяготеющих к МТК.

Определяющим параметром выбора схемы перевозки грузов, тарифообразования на любом виде транспорта является расстояние между обозначенными пунктами отправления и прибытия груза. Учитывая требование к большой провозной способности транспортного коридора по территории РФ, где расстояния несопоставимо выше по сравнению с другими регионами (например, в ЕС), роль железнодорожного транспорта невозможно переоценить. Автомобильные перевозки занимают в отдельных сегментах транспортного рынка монопольное положение за счет мобильности и расстояния. Рассматривая конкурентоспособность того или иного транспортного коридора, возможности по привлечению грузопотоков и увеличению номенклатуры перевозимых грузов, необходимо изучить возможности транспортной инфраструктуры видов транспорта, а при мультимодальных перевозках и расстояния между пунктом зарождения грузопотока и ближайшим пунктом (железнодорожная станция), обеспечивающим их «включение» в МТК [6]. Представленная на рисунке 1 схема иллюстрирует зоны притяжения транспортного коридора в зависимости от расстояния.

Пусть для представленной схемы точка D – пункт зарождения грузопотока, относящийся к зоне конкуренции транспортных коридоров, а точка C – пункт «включения» смежных грузопотоков в транспортный коридор AB . Условия, необходимые для притяжения грузопотоков из точки D на маршруты МТК AB , имеют следующий вид:

$$T_{DC}^{\text{авто}} + T_{CB}^{\text{жд}} < T_{DB}^{\text{авто}}, M_{DC}^{\text{авто}} + M_{CB}^{\text{жд}} < M_{DB}^{\text{авто}}; \quad (1)$$

$$T_{DC}^{\text{авто}} + T_{CB}^{\text{жд}} > T_{DB}^{\text{авто}}, \text{ но } M_{DC}^{\text{авто}} + M_{CB}^{\text{жд}} < M_{DB}^{\text{авто}}; \quad (2)$$

$$M_{DC}^{\text{авто}} + M_{CB}^{\text{ЖД}} > M_{DB}^{\text{авто}}, \text{ но } T_{DC}^{\text{авто}} + T_{CB}^{\text{ЖД}} < T_{DB}^{\text{авто}}. \quad (3)$$

где T – срок доставки грузов, сут;

M – стоимость перевозки грузов, руб., на указанном маршруте автомобильным («авто») или железнодорожным («жд») транспортом.

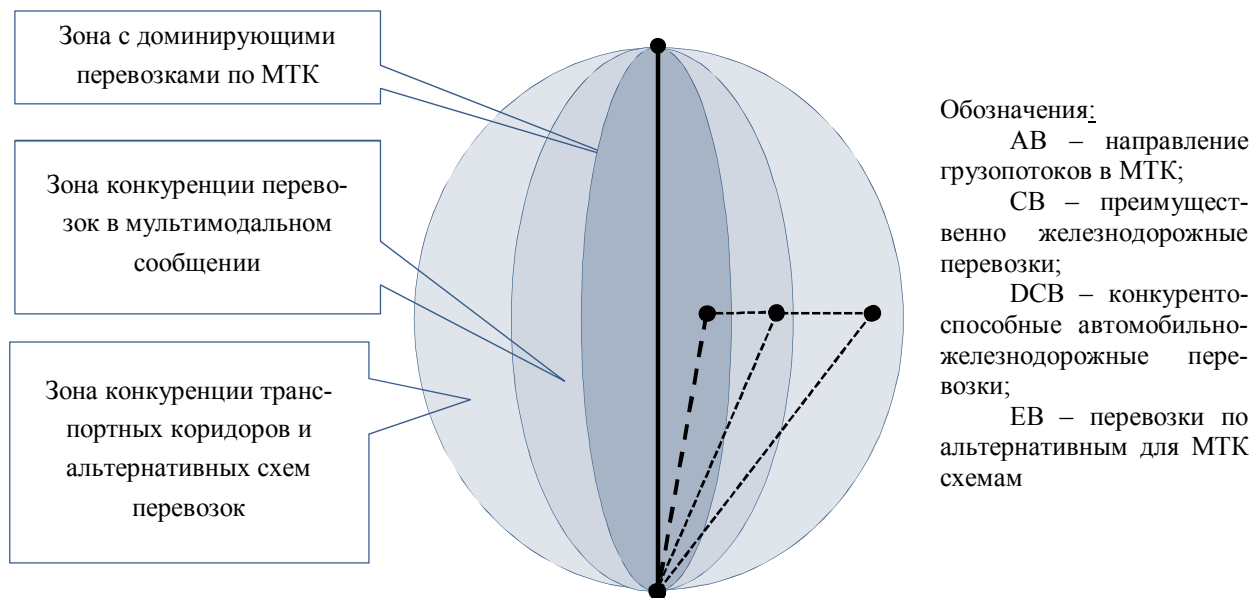


Рисунок 1 – Схема зон притяжения транспортного коридора

Условия (2), (3) определяют неполное доминирование мономодальной перевозки перед мультимодальной, в то же время грузопоток может быть вовлечен в МТК по остальным параметрам организации перевозок (регулярность, надежность, экологичность и т. д.). Возникает задача определения грузовой базы с учетом удовлетворения главных для грузовладельцев параметров перевозки (срок доставки, стоимость перевозки), с привлечением грузопотоков со смежных маршрутов, которую можно локализовать в следующих подзадачах:

анализ и расчет возможных схем доставки грузов согласно тарифообразованию на различных видах транспорта;

графическое представление и описание возможностей транспортного коридора в конкурентной среде;

распределение грузопотоков транспортного коридора согласно выбранной схеме доставки.

Графическая модель международного транспортного коридора «Север – Юг» [7], наглядно показывающая возможные точки «входа» на маршруты МТК, представлена на рисунке 2. В графе представлены доминантные вершины, формирующие грузовую базу или определяющие схему перевозки в мультимодальном сообщении. Доминирующим в связях между вершинами считаем железнодорожные участки. Участки автомобильных дорог (сообщений) приводятся с расчетом кратчайшего расстояния между транспортными узлами.

Анализ и расчет возможных схем доставки грузов согласно тарифообразованию на различных видах транспорта представляем в приведенных ниже обобщенных формализованных схемах.

Моноmodalная схема перевозки.

Известно, что автомобильные перевозки осуществляются с использованием километрового тарифа, а с учетом затрат на начально-конечных операциях тариф имеет следующую зависимость от расстояния:

$$t^{\text{aBT}}(l) = a_0^{\text{aBT}} + a_1^{\text{aBT}}l, \quad (4)$$

а тариф на железнодорожные перевозки носит нелинейный характер и имеет вид функции

$$t^{\text{ЖД}}(l) = a_0^{\text{ЖД}} + a_1^{\text{ЖД}}l + a_2^{\text{ЖД}}l^2, \quad (5)$$

где $a_0^{\text{авт}}, a_1^{\text{авт}}, a_0^{\text{ЖД}}, a_1^{\text{ЖД}}, a_2^{\text{ЖД}}$ – параметры; l – расстояние перевозки.

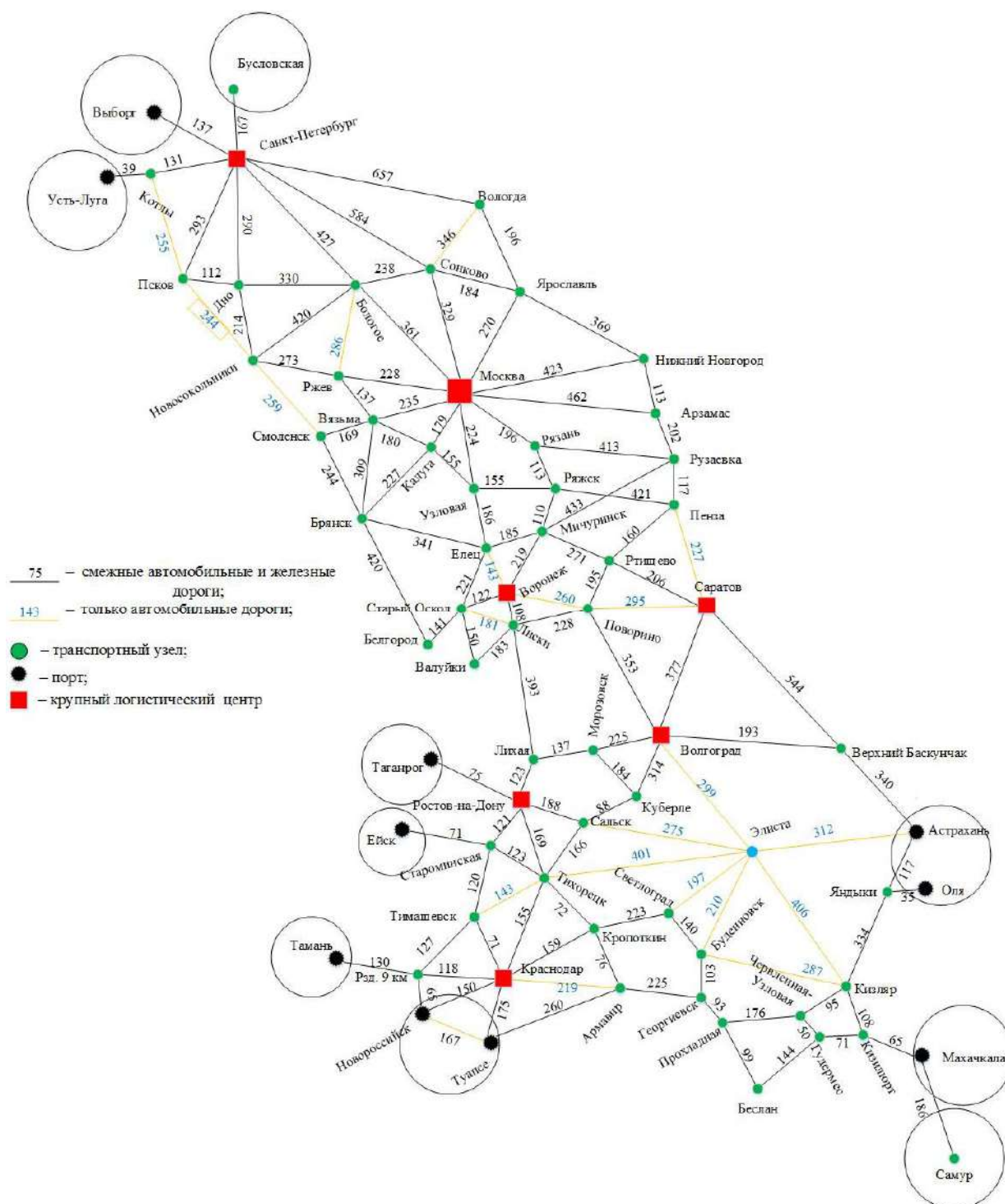


Рисунок 2 – Графическая модель международного транспортного коридора «Север – Юг»

Мы исходим из того, что по параметру «скорость доставки груза» перевозки по МТК осуществляются по схемам, удовлетворяющим грузоотправителей. Такая задача ставится и при долгосрочных программах развития транспорта. Так, в соответствии с «Долгосрочной

программой развития железнодорожного транспорта до 2025 г.» контейнерные поезда будут доставлять груз от Выборга до Самура (МТК «Север – Юг») за 2,1 суток [8, 9].

В этих условиях определение грузовой базы МТК в зависимости от расстояния и стоимости перевозки возможно из решения уравнения

$$a_0^{\text{авт}} + a_1^{\text{авт}} l = a_0^{\text{жд}} + a_1^{\text{жд}} l + a_2^{\text{жд}} l^2 \quad (6)$$

Естественно предположить выполнение условий

$$a_0^{\text{жд}} - a_0^{\text{авт}} > 0, a_1^{\text{жд}} - a_1^{\text{авт}} < 0. \quad (7)$$

В условиях (7) неотрицательное решение уравнения имеет вид:

$$l^* = -\frac{1}{2} \left(\frac{(a_1^{\text{жд}} - a_1^{\text{авт}})}{(a_0^{\text{жд}} - a_0^{\text{авт}})} - \sqrt{\left(\frac{(a_1^{\text{жд}} - a_1^{\text{авт}})}{(a_0^{\text{жд}} - a_0^{\text{авт}})} \right)^2 - \frac{4a_2^{\text{жд}}}{a_0^{\text{жд}} - a_0^{\text{авт}}}} \right) \quad (8)$$

или

$$l^* = -\frac{1}{2} \left(R_0 - \sqrt{R_0^2 - \frac{4a_2^{\text{жд}} R_0}{a_1^{\text{жд}} - a_1^{\text{авт}}}} \right), R_0 = \frac{(a_1^{\text{жд}} - a_1^{\text{авт}})}{(a_0^{\text{жд}} - a_0^{\text{авт}})}. \quad (9)$$

Значение l^* определяет дальность перевозки, при этом значении предпочтительность автомобильных перевозок по критерию стоимости переходит железнодорожному транспорту при мономодальной схеме транспортировки (рисунок 3).

Мультимодальная схема перевозки.

При приведенных выше допущениях считаем, что перевозка осуществляется автомобильным и железнодорожным транспортом, причем возможны варианты схемы:

автомобильный – железнодорожный;

железнодорожный – автомобильный;

автомобильный – железнодорожный – автомобильный.

Не теряя общности изложения, следует отметить две ключевые составляющие тарифа: линейная – автомобильная, нелинейная – железнодорожная.

Пусть автомобильная составляющая расстояния перевозки имеет протяженность l_a , причем она не зависит от ее расположения на схеме и числа участков автомобильных перевозок. На практике автомобильная перевозка осуществляется до ближайшей железнодорожной станции.

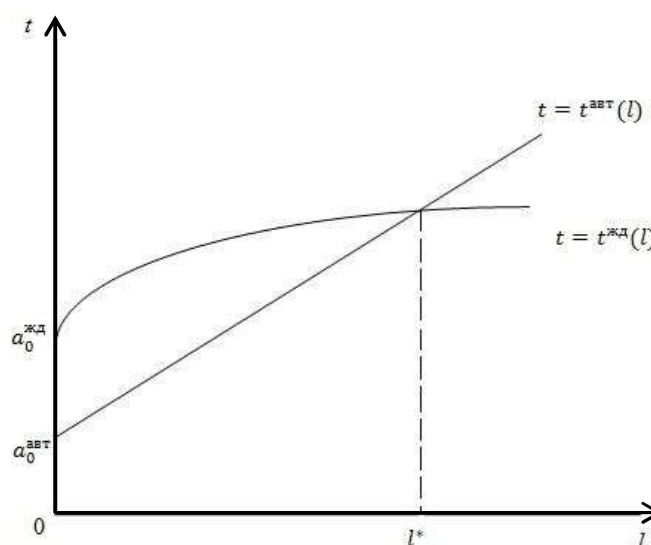


Рисунок 3 – Схема-график иллюстрации конкуренции при мономодальной перевозке

Тогда оценка конкурентоспособности мультимодальной схемы перевозки в сравнении с мономодальной автомобильной определяется по уравнению

$$t^{\text{авто}}(l_a) + t^{\text{ЖД}}(l - l_a) = t^{\text{авто}}(l), \quad (10)$$

или

$$a_0^{\text{авт}} + a_1^{\text{авт}} l_a + a_0^{\text{ЖД}} + a_1^{\text{ЖД}}(l - l_a) + a_2^{\text{ЖД}}(l - l_a)^2 = a_0^{\text{авт}} + a_1^{\text{авт}} l. \quad (11)$$

Решение уравнения (11) определяет l^{**} :

$$l^{**} - l_a = \frac{-(a_1^{\text{ЖД}} - a_1^{\text{авт}}) + \sqrt{(a_1^{\text{ЖД}} - a_1^{\text{авт}})^2 - 4a_2^{\text{ЖД}} a_0^{\text{ЖД}}}}{-2a_2^{\text{ЖД}}}. \quad (12)$$

Графическая иллюстрация решения приведена на рисунке 4.

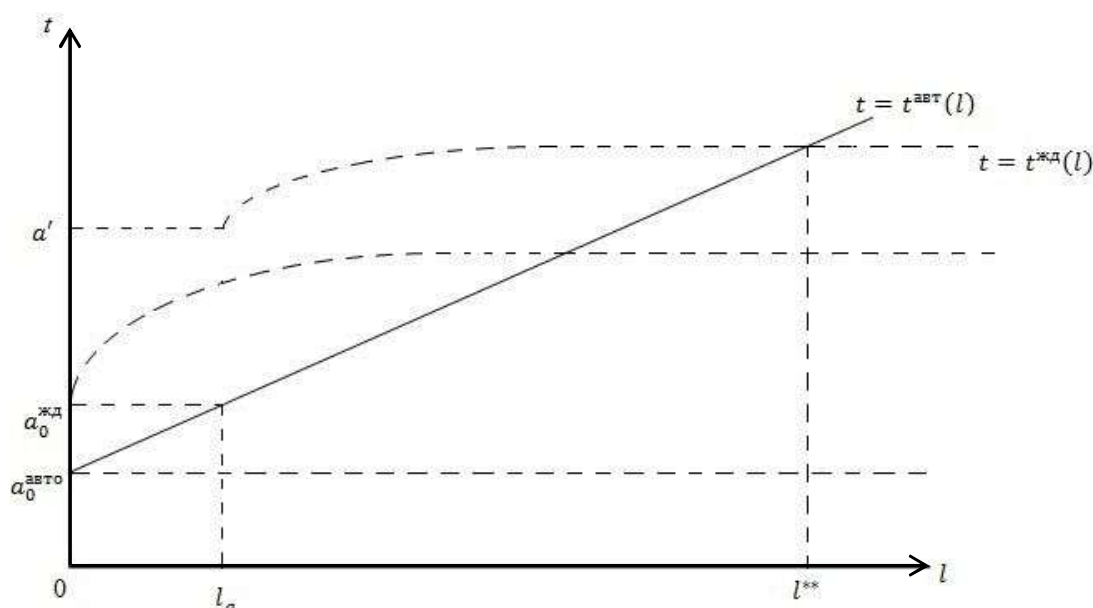


Рисунок 4 – Схема-график иллюстрации конкуренции при мультимодальной перевозке

Если $l > l^{**}$ – выгодна мультимодальная перевозка (на расстоянии l_a – автомобильный транспорт, а на расстоянии $l - l_a$ – железнодорожный транспорт).

При схеме перевозки «автомобильный – железнодорожный – автомобильный» в расчетах l^{**} вместо $a_0^{\text{авт}}$ принимается $2a_0^{\text{авт}}$.

Расчет грузовой базы МТК «Север – Юг» проводится на базе кратчайших (тарифных) расстояний, определяемое по классическому алгоритму Дейкстры между предполагаемыми пунктами зарождения (входа) транзитных грузопотоков (Бусловская, Усть-Луга, Выборг) и пунктами выхода (Таганрог, Ейск, Новороссийск, Тамань, Туапсе, Самур, Оля, Махачкала) для автомобильного и железнодорожного транспорта.

На практике для упрощения расчетов граф транспортной сети $G(P, W)$ делится на подграфы, являющиеся его собственными подграфами $G'_1(P'_1; W'_1)$, $G'_2(P'_2; W'_2)$, ..., $G'_n(P'_n; W'_n)$ такими, что $G'_n \subseteq G$, $P'_n \subseteq P$, $W'_n \subseteq W$, $P'_n \neq P$, $W'_n \neq W$. Для каждого подграфа производится расчет наикратчайшего маршрута перевозки транзитных грузов от вершины-истока (зоны зарождения транзитного грузопотока) до вершины-стока (зоны погашения транзитного грузопотока или стыкового пункта), которые могут использоваться для расчетов грузовой базы по формулам (10) или (12).

Ниже приведены вершины, принадлежащие каждому из подграфов.

1. Подграф G'_1 : Бусловская, Санкт-Петербург, Выборг, Усть-Луга, Котлы, Псков, Дно, Бологое, Сонково, Вологда, Ярославль, Нижний Новгород, Новосокольники, Ржев, Вязьма, Москва.

2. Подграф G'_2 : Москва, Вязьма, Нижний Новгород, Смоленск, Брянск, Калуга, Узловая, Рязань, Рязск, Арзамас, Рузаевка, Мичуринск, Пенза, Старый Оскол, Воронеж, Белгород, Елец, Валуйки, Ртищево, Лиски, Поворино, Саратов.

3. Подграф G'_3 : Лиски, Поворино, Саратов, Ростов-на-Дону, Лихая, Верхний Баскунчак, Сальск, Морозовск, Куберле, Волгоград, Тихорецк, Староминская, Тимашевск, Краснодар, Кропоткин, Армавир, Светлоград, Буденновск, Георгиевск, Прохладная, Гудермес, Беслан, Кизилюрт, Кизляр, Червленная-Узловая, Яндыки, Разъезд 9 км., Махачкала, Астрахань, Оля, Ейск, Таганрог, Туапсе, Тамань, Новороссийск, Самур.

Результаты расчета кратчайших расстояний (таблица 1) приведены для графа, изображенного на рисунке 2. Тарифы на перевозку зависят от вида груза и других параметров. Далее будем рассматривать контейнерные перевозки, которые являются достаточно не зависими от физико-химических характеристик содержания (груза). Для железнодорожных перевозок стоимость будет рассчитываться на один контейнер в составе грузового контейнерного поезда.

Таблица 1 – Расчет кратчайших расстояний для графа $G(P,W)$ при автомобильной (авто) и железнодорожной (ж/д) перевозках, км

Пункт назначения \ Пункт отправления	Бусловская		Выборг		Усть-Луга	
	авто	ж/д	авто	ж/д	авто	ж/д
Таганрог	2207	2162	2177	2141	2210	2171
Ейск	2324	2268	2294	2247	2327	2777
Тамань	2630	2533	2600	2512	2633	2542
Новороссийск	2565	2478	2535	2457	2568	2487
Туапсе	2619	2538	2589	2517	2622	2547
Оля	2806	2557	2776	2536	2809	2566
Махачкала	2999	2875	2624	2854	2657	2884
Самур	3185	3037	2969	3016	3002	3046

Расчет стоимости транзитных контейнерных перевозок железнодорожным транспортом проводился с использованием программы АС «Этран» и Тарифного руководства № 1-4. Исходные данные для расчета стоимости перевозки транзитного груза железнодорожным транспортом приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета стоимости перевозки транзитного груза железнодорожным транспортом

Наименование груза (код ЕТСНГ)	Вес груза, т	Тип вагона	Тип упаковки	Кол-во вагонов ^{*)}	Тип собственника вагона
Оборудование прочее, машины различного назначения и запасные части к нему (351306)	28	Фитинговая платформа	20-футовый контейнер Upgraded с повышенной загрузкой в 28180 кг, массой тары 2300 кг, вместимостью 32,6 м ³	42	Собственный (арендованный)

^{*)}Отправка одного вагона осуществляется согласно плану формирования в контейнерном поезде, что обеспечивает оперативное продвижение грузов в пункты назначения [10].

Процесс тарифообразования на автомобильном транспорте зависит от множества факторов (расходы на топливо и на горюче-смазочные материалы, заработная плата, налоги и пошлины и др.), поэтому в данной статье для расчета стоимости перевозки автомобильным транспортом аналогичного груза выбрано среднее значение тарифа – 4,3 руб./ткм, использу-

емого транспортно-информационным сервисом transportica.com. Номенклатура перевозимого груза определялась исходя из потребности экономик стран Южной Азии (в частности, Индии).

В результате произведенных расчетов получены данные стоимости перевозки и сроков доставки грузов автомобильным и железнодорожным видами транспорта (таблица 3).

Разница в стоимости между железнодорожной и автомобильной перевозками объясняется способностью железнодорожного транспорта к массовым перевозкам именно тяжеловесных грузов с наименьшими затратами в сравнении с автотранспортом, а также предоставляемыми ОАО «РЖД» пониженными тарифами на перевозку контейнерных грузов.

Таблица 3 – Параметры оценки привлекательности транспортного коридора

Наименование транспортного узла	Автомобильный транспорт			Железнодорожный транспорт		
	Бусловская	Выборг	Усть-Луга	Бусловская	Выборг	Усть-Луга
<i>Стоимость перевозки транзитных грузов в контейнере, USD^{*)}</i>						
Таганрог	3144,7	3101,9	3148,9	682	680	682
Ейск	3311,4	3268,6	3315,6	685	685	685
Тамань	3747,4	3704,6	3751,6	703	700	700
Новороссийск	3654,7	3612,0	3659,0	697	695	695
Туапсе	3731,7	3688,9	3735,9	705	703	705
Оля	3998,1	3955,4	4002,4	700	700	700
Махачкала	4273,1	4230,4	4277,4	718	715	715
Самур	4538,1	4495,4	4542,4	725	723	725
<i>Сроки доставки транзитных грузов в контейнере, сут</i>						
Таганрог	3	3	3	7	8	8
Ейск	3	3	3	7	8	8
Тамань	3	3	3	8	9	9
Новороссийск	3	3	3	8	9	9
Туапсе	3	3	3	8	9	9
Оля	3	3	3	8	9	9
Махачкала	4	4	4	8	9	9
Самур	4	4	4	8	9	9

^{*)} Расчет сроков доставки для автомобильного транспорта производился согласно Постановлению [11], в котором обозначен режим труда и отдыха водителей-дальнобойщиков (9 – 11 часов в сутки).

На основе анализа полученных данных стоимости перевозки и сроков доставки грузов авторами сделаны следующие выводы.

1. Расчеты сроков доставки для железнодорожного транспорта не соответствуют Распоряжению Правительства РФ [9], но по экспертным оценкам срок доставки будет сокращен не менее чем в два раза, к примеру, за счет изменения маршрута перевозки: согласно расчетам авторов кратчайшее расстояние от Выборга до Самура составляет 3016 км и проходит по оси: Выборг – Санкт-Петербург – Бологое – Москва – Рязань – Рязск – Мичуринск – Ртищево – Саратов – Астрахань – Кизляр – Махачкала – Самур, в то время как при расчете через АС «Этран» маршрут проходит по оси Выборг – Санкт-Петербург – Вологда – Ярославль – Орехово-Зуево (Москва) – Рязань – Рязск – Мичуринск – Поворино – Верхний Баскунчак – Астрахань – Кизляр – Махачкала – Самур и составляет 3345 км, огибая напряженный участок Санкт-Петербург – Бологое – Москва [10].

2. При отсутствии технологических и технических средств усиления пропускной способности железнодорожной линии Санкт-Петербург – Бологое – Москва для пропуска транзитных грузовых поездов с целью сокращения сроков доставки существует возможность использования мультимодальной схемы доставки груза: централизованный подвоз в точку притяжения (логистический центр) контейнеров автомобильным транспортом и дальнейшее формирование «твердых» ниток графика движения для контейнерных поездов.

Таким образом, на оценку потенциала развития грузовой базы МТК имеет существенное влияние национальная тарифная политика в сфере грузовых перевозок. Стратегические перс-

пективы развития МТК «Север – Юг» связаны с внешними факторами, геополитическим положением и трендами. Приведенные выше методические подходы оценки грузовой базы и практические расчеты позволяют говорить о возможности увеличения грузовой базы за счет организации перевозок в смешанном автомобильно-железнодорожном сообщении. Ликвидации приведенных инфраструктурных ограничений железнодорожной сети сегодня ОАО «РЖД» придается особое внимание. Эти ограничения предлагается устранить путем привлечения инвестиций, реализации информационных и организационных управленческих решений, например, проектов разделения грузовых и пассажирских направлений перевозок [12].

Список литературы

1. Сорокин, Д. В. Анализ транзитного потенциала Северо-Кавказской железной дороги в обеспечении грузоперевозок по международному транспортному коридору «Север – Юг» / Д. В. Сорокин. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (52). – С. 26 – 32.
2. Манусов, В. З. Электрификация международного транспортного железнодорожного коридора «Азия – Европа» как путь устойчивого развития электроэнергетической системы Монголии / В. З. Манусов, Б. В. Палагушкин, У. Бумцэнд. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016. – № 4 (28). – С. 94 – 101.
3. Мамаев, Э. А. Актуальные направления развития системы транспортных коридоров в России и мире / Э. А. Мамаев, Б. И. Алибеков. – Текст : непосредственный // Сб. науч. трудов «Транспорт: наука; образование; производство. Технические и экономические науки». – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – Т. 1. – С. 40 – 43.
4. Бубнова, Г. В. Транспортные коридоры и оси в евразийских коммуникациях / Г. В. Бубнова, А. А. Зенкин, П. В. Куренков. – Текст : непосредственный // Логистика – Евразийский мост : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Москва : Всероссийский институт научной и технической информации РАН, 2017. – С. 25 – 33.
5. Инновационные процессы логистического менеджмента в интеллектуальных транспортных системах : монография: в 4 т. / под общ. ред. проф. Б. А. Лёвина и проф. Л. Б. Миротина. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2015. – Т. 1. – 336 с. – Текст : непосредственный.
6. Инновационные процессы логистического менеджмента в интеллектуальных транспортных системах: монография: в 4 т. / Под общ. ред. проф. Б.А. Лёвина и проф. Л.Б. Миротина. – Москва: УМЦ ЖДТ, 2015. – Т. 3. – 337 с. – Текст : непосредственный.
7. Мамаев, Э. А. К оценке потенциала развития международного транспортного коридора: теоретические аспекты / Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин, И. Д. Долгий. – Текст : непосредственный // Вестник РГУПС. – 2020. – № 4. – С. 89 – 101.
8. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466 р. «О долгосрочной программе развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года». – Текст : электронный. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/553927831> (дата обращения: 10.11.2020).
9. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 2101-р от 30.09.2018 г. «О комплексном плане модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года (с изменениями на 13.03.2020)». – Текст : электронный. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/551365461> (дата обращения: 20.09.2020).
10. Распоряжение ОАО «РЖД» от 2 октября 2020 г. № 2191-р «О порядке организации перевозки груженых и порожних контейнеров в составе контейнерных поездов». – Текст : электронный. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/566108822> (дата обращения: 12.09.2020).
11. Постановление Правительства Российской Федерации от 23.10.1993 г. № 1090 (ред. от 26.03.2020) «О Правилах дорожного движения» (вместе с «Основными положениями по допуску транспортных средств к эксплуатации и обязанности должностных лиц по обеспечению безопасности дорожного движения»). – Текст : электронный. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_2709/ (дата обращения: 15.11.2020).

12. Кузьмин, П. С. Возможности повышения конкурентоспособности железнодорожных грузоперевозок по транспортным коридорам Российской Федерации / П. С. Кузьмин. – Текст : непосредственный // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2020. – Т. 11. – № 2. – С. 160 – 171.

References

1. Sorokin D. V. North Caucasus railway transit potential's analysis in providing freight traffic along the «North – South» international transport corridor [Analiz tranzitnogo potenciala Severo-Kavkazskoj zheleznoj dorogi v obespechenii грузоперевозок по mezhdunarodnomu transportnomu koridoru «Sever – Jug»]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija – Bulletin of the Siberian State transport University*, 2020, no. 1 (52), pp. 26 – 32.

2. Manusov V. Z., Palagushkin B. V., Bumcend U. The electrification of international transport railway corridor from Asia to Europe as a way of power system sustainable development of Mongolia [Jelektrifikacija mezhdunarodnogo transportnogo zheleznodorozhnogo koridora «Azija – Evropa» kak put' ustojchivogo razvitija elektrojenergeticheskoy sistemy Mongolii]. *Izvestija Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 4 (28), pp. 94 – 101.

3. Mamaev Je. A., Alibekov B. I. Current trends in the development of the transport corridor system in Russia and the world [Aktual'nye napravlenija razvitija sistemy transportnyh koridorov v Rossii i mire]. *Sbornik nauchnykh trudov «Transport: nauka; obrazovanie; proizvodstvo. Tekhnicheskie i ekonomicheskie nauki»* (Collection of scientific papers «Transport: science; education; production. Technical and economic sciences»). – Rostov-on-Don, 2018, vol. 1, pp. 40 – 43.

4. Bubnova G. V., Zenkin A. A., Kurenkov P. V. Transport corridors and axes in Eurasian communications [Transportnye koridory i osi v evrazijskih kommunikacijah]. *Logistika – Evraziiskii most : materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Logistics-The Eurasian Bridge: materials of the international scientific and practical conference). Moscow, 2017, pp. 25 – 33.

5. *Innovacionnye processy logisticheskogo menedzhmenta v intellektual'nyh transportnyh sistemah: monografiia v 4-kh tomakh* (Innovative logistics management processes in intelligent transport systems: monograph in 4 volumes), under the General editorship of prof. B. A. Levin and prof. L. B. Mirotin. Moscow: Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte Publ., 2015, vol. 1 «*Innovacionnye processy v ramkah transportnogo menedzhmenta* (Innovative processes in the framework of transport management)», 336 p.

6. *Innovacionnye processy logisticheskogo menedzhmenta v intellektual'nyh transportnyh sistemah: monografiia v 4-kh tomakh* (Innovative logistics management processes in intelligent transport systems: monograph in 4 volumes), under the General editorship of prof. B. A. Levin and prof. L. B. Mirotin. Moscow: Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte Publ., 2015, vol. 3 «*Novye krupnye innovacionnye razrabotki konkretnyh zadach v oblasti logisticheskogo menedzhmenta* (New major innovative developments of specific tasks in the field of logistics management)», 337 p.

7. Mamaev Je. A., Sorokin D. V. To assess the development potential international transport corridor: theoretical aspects [K ocenke potenciala razvitija mezhdunarodnogo transportnogo koridora: teoreticheskie aspekty]. *Vestnik RGUPSa – Bulletin of Rostov State Transport University*, 2020, no. 4, pp. 89 – 101.

8. *Rasporjazhenija Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 19 marta 2019 g. №466 r. «O Dlgosrochnoj programme razvitija otkrytogo akcionernogo obshhestva «Rossijskie zheleznye dorogi» do 2025 goda»* (Order of the Government of the Russian Federation No. 466-R. of March 19, 2019. «On the long-Term development program of open joint stock company Russian Railways until 2025»), Available at: <http://docs.cntd.ru/document/553927831> (accessed 10 November 2020).

9. *Rasporjazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii № 2101-r ot 30.09.2018 g. «O Kompleksnom plane modernizacii i rasshirenija magistral'noj infrastruktury na period do 2024 goda (s izmenenijami na 13.03.2020 g.)»* (Order of the Government of the Russian Federation No. 2101-R of 30.09.2018. «On the Comprehensive plan for the modernization and expansion of the main infra-

structure for the period up to 2024 (as amended on 13.03.2020)), Available at: <http://docs.cntd.ru/document/551365461> (accessed 20 September 2020).

10. *Rasporjazhenie OAO «RZhD» ot 2 oktjabrja 2020 g. № 2191-r «O Porjadke organizacii perevozki gruznyh i porozhnyh kontejnerov v sostave kontejneryh poezdov»* (Order of JSC «Russian Railways» dated October 2, 2020 No. 2191-R «On the procedure for organizing the transportation of loaded and empty containers as part of container trains»), Available at: <http://docs.cntd.ru/document/566108822> (accessed 12 September 2020).

11. *Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 23.10.1993 g. № 1090 (red. ot 26.03.2020 g.) «O Pravilah dorozhnogo dvizhenija» (vmeste s «Osnovnymi polozenijami po dopusku transportnyh sredstv k jekspluatacii i objazannosti dolzhnostnyh lic po obespečeniju bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija»)* (Order of the Government of the Russian Federation of 23.10.1993 No. 1090 (ed. of 26.03.2020) «On the Rules of the road» (together with the «Basic provisions for the admission of vehicles to operation and the duties of officials to ensure road safety», Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_2709/ (accessed 15 November 2020).

12. Kuz'min P. S. Opportunities to improve the competitiveness of rail freight transport along the transport corridors of the Russian Federation [Vozmozhnosti povyshenija konkurentosposobnosti zheleznodorozhnyh gruzoperevozok po transportnym koridoram Rossijskoj Federacii]. *Strategicheskie reshenija i risk-menedzhment – Strategic decisions and risk management*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 160 – 171.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мамаев Энвер Агапашевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения пл., д. 2., 344038, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Логистика и управление транспортными системами».

Тел.: + 7 (863) 272-64-14.

E-mail: mamaev_enver@mail.ru

Сорокин Дмитрий Валерьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения пл., д. 2., 344038, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Соискатель кафедры «Логистика и управление транспортными системами».

Тел.: + 7-900-121-72-98.

E-mail: 2013014015@list.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мамаев, Э. А. К оценке потенциала развития международного транспортного коридора «Север – Юг» / Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 86 – 96.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mamaev Enver Agapashевич

Rostov State Transport University.

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, the Russian Federation.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of chair «Logistics and transport systems management».

Phone: + 7 (863) 272-64-14.

E-mail: mamaev_enver@mail.ru

Sorokin Dmitriy Valeryevich

Rostov State Transport University.

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, the Russian Federation.

Applicant of chair «Logistics and transport systems management».

Phone: +7-900-121-72-98.

E-mail: 2013014015@list.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mamaev E. A., Sorokin D. V. To assess the development potential of the «North – South» international transport corridor. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 3 (43), pp. 86 – 96 (In Russian).

УДК 656.223

К. А. Годованый, М. В. Колесников

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АУТСОРСИНГ КАК ИНСТРУМЕНТ РАЗВИТИЯ РЫНКА ОПЕРАТОРСКИХ КОМПАНИЙ

Аннотация. Организация перевозочного процесса в масштабах Российской Федерации на железнодорожном транспорте претерпела множество изменений с момента начала структурной реформы. Была создана конкурентная среда на рынке грузовых перевозок путем выделения вагонной составляющей в тарифе на перевозку. В результате возник рынок собственников подвижного состава, который определил потребность в новых инструментах для оптимизации технологических процессов взаимодействия участников процесса перевозок.

Цель работы – проанализировать деятельность операторских компаний с точки зрения выполняемых ими функций и определить потенциальные направления развития. Проведен анализ организационной структуры и организационно-распорядительной документации крупных операторских компаний, а также проанализированы результаты маркетинговых исследований журнала «РЖД-Партнер» по оценке удовлетворенности грузоотправителей услугами операторов подвижного состава. Рассмотрены теоретические направления исследования в области повышения эффективности управления вагонным парком за счет консолидации разобщенного вагонного парка под управлением единого координирующего органа управления.

Выделены основные функции, исполняемые операторами в настоящий момент на транспортном рынке. Оценка индекса качества позволила выяснить, что поведение собственников подвижного состава коррелирует с конъюнктурой рынка, а сами собственники проводят клиентоориентированную политику. Показано, что возможности диверсификации бизнеса в этой области изучены слабо, хотя для удовлетворения потребностей клиентов компании расширяют перечень предоставляемых услуг. На основе систематизированного анализа предлагается для операторских компаний возможность диверсификации операторского бизнеса технологическим аутсорсингом, который позволит повысить качество их основных услуг, а также интегрироваться в соответствующие функциональные подсистемы контрагентов – транспортные предприятия и грузоотправители.

Ключевые слова: операторская деятельность, индекс качества, диверсификация бизнеса, технологический аутсорсинг, управление цепями поставок, управление вагонным парком.

Kirill A. Godovany, Maksim V. Kolesnikov

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, the Russian Federation

TECHNOLOGICAL OUTSOURCING AS A TOOL FOR MARKET DEVELOPMENT OF OPERATOR COMPANIES

Abstract. New activities have appeared in Russia as a result of the structural reform of the railway industry. Operation of rolling stock is one of them. Operator companies have assumed this function, but now there is a surplus of rolling stock in the transport market. There is a need to develop methods and algorithms to improve the efficiency of this activity.

The aim of this work is to analyze the activities of the owners of rolling stock, their organizational structure, the situation on the transport services market and identify directions for business diversification. Theoretical studies in the field of car fleet management are considered in the work.

As a result, the main functions of the operator companies were identified. An assessment of the state of the market indicates that operators are pursuing a client-oriented policy and are gradually expanding the range of services provided. Technological outsourcing as a way of diversification was presented in the final part of the work. It enhances the quality of the operators' services.

Keywords: operator activity, index of quality, business diversification, technological outsourcing, supply chain management, car fleet management.

Значительные географические масштабы страны в развитии железнодорожного транспорта изначально предопределили применение экстенсивного метода освоения рынка пере-

возок и удовлетворения потребности клиентов в железнодорожных перевозках. В настоящее время наблюдается насыщение рынка перевозок подвижным составом – вагонами – как положительный результат транспортной реформы по разделению консолидированного инвентарного парка вагонов ОАО «РЖД» между операторами-собственниками. Достигнута одна из ключевых целей реформирования в этой сфере – формирование конкурентного сегмента рынка предоставления подвижного состава для грузовых перевозок. Вследствие этого методы управления подвижным составом, разработанные ранее при едином парке, сегодня требуют развития. Для создания инвестиционной привлекательности и повышения конкурентоспособности предприятий этого сегмента рынка необходимы разработка методов интенсификации их развития, диверсификации деятельности, расширение аутсорсинга и инсорсинга услуг, направленных на сохранение текущего объема производства, устойчивости и стабильности как отдельных предприятий, так и в целом сегмента рынка.

Многообразие направлений диверсификации деятельности операторских компаний требует их критического анализа в части состоятельности, технологической и экономической целесообразности. Конечная цель трансформации и диверсификация деятельности операторских компаний реализацией процедур аутсорсинга и инсорсинга – снижение интегрированных логистических издержек с увеличением качества транспортных услуг – требует адресного поиска и реализации процедур с учетом специализации и технологического и финансового состояния предприятия. Безусловное изменение организационно-технологического взаимодействия и перераспределения некоторых функций между участниками транспортного рынка потребовало анализа видов деятельности предприятий, точек их роста, технологических и экономических рисков деятельности.

Согласно Постановлению [1] целями и задачами реформы в области грузовых перевозок являлось создание и дальнейшее развитие конкурентной среды, а также «обеспечение гарантированного недискриминационного доступа к инфраструктуре федерального железнодорожного транспорта независимых грузовых и пассажирских компаний-операторов и пользователей подвижного состава». Указанное Постановление определяет создание экономической экосистемы, изолированной от государственного регулирования, которая развивается по естественным экономическим законам, создавая условия для здоровой конкуренции и обеспечивая доступ к сетевой инфраструктуре любого независимого перевозчика или оператора. Операторские компании становятся промежуточным связующим элементом в цепочке «клиент – перевозчик». В конечном итоге в реализации реформы операторам отводится роль независимых перевозчиков с возможностью приобретения собственных локомотивов у производителя.

Анализ организационной структуры крупных компаний-операторов, а также их организационно-распорядительной документации позволяет выделить ключевые направления деятельности компаний, определить их цели, задачи и функции. Укрупненно совокупной функцией, характеризующей деятельность операторских компаний, является осуществление качественного и своевременного взаимодействия с организациями и промышленными предприятиями по предоставлению услуг в сфере грузовых перевозок на железнодорожном транспорте, которую можно разделить на следующие элементы.

1) Оперирование вагонным парком. Это основной вид деятельности компании, который заключается в предоставлении подвижного состава клиентам для обеспечения их потребностей в перевозке. Согласно последним отчетам крупных компаний-операторов [2, 3] данная категория услуг составляет в разных случаях от 80 до 90 % всей выручки компании. Для эффективного функционирования в данной области предприятия имеют разветвленную сеть филиалов, имеющих возможность оперативного регулирования ситуации на местах. В структуру компании или филиала включены подразделения, обеспечивающие выполнение работ по оперативному управлению вагонным парком, что подразумевает отслеживание дислокации вагонов, переадресацию груженых и порожних вагонов, взаимодействие с перевозчиком и грузовладельцами на станциях погрузки и выгрузки по подготовке вагонов соот-

ветствующего типа, а также в плане соблюдения регламента и сроков выполнения ключевых операций. Отдельным видом деятельности при управлении вагонным парком можно выделить предоставление вагонов в оперирование сторонним организациям на возмездной основе.

2) Экспедирование грузов. Является комплексной услугой, предполагающей информационное и финансовое сопровождение груза, обеспечение повышенного уровня сохранности при организации перевозки грузов.

3) Содержание и ремонт вагонного парка. Относится к основным поддерживающим функциям, выполняемым компаниями-операторами, которые условно можно разделить на две укрупненные категории: функции по обеспечению сохранности, куда можно отнести все мероприятия по поддержанию вагонного парка в рабочем состоянии, а также по расследованию и оценке случаев нанесения ущерба; ко второй категории относят функции ремонта, управления парком неисправных вагонов, а также разработку мероприятий по повышению сохранности вагонов и увеличению срока их службы.

4) Актово-претензионная деятельность. Относится к поддерживающим функциям и обеспечивает взаимодействие с контрагентами на правовом уровне, данный вид деятельности необходим для минимизации (исключения) финансовых и прочих видов потерь, возникающих в условиях оказания услуг перевозки, от споров между компанией и клиентами.

Анализ качественных показателей деятельности крупнейших операторских компаний, которые определяют основные тенденции и направления развития железнодорожного транспортного рынка выявил, что объемы работы операторов имеют стабильные показатели, транспортный рынок грузовых перевозок после структурной реформы железнодорожного транспорта приобрел устойчивое состояние, структура вагонного парка в большей степени соответствует потребностям народного хозяйства [4].

Развитие процесса, продукта или услуги характеризует этапы жизненного цикла: прогресс, стагнация и регресс. В транспортной отрасли прогресс принял форму реформы, преследовавшей конкретные цели, которые к настоящему моменту практически достигнуты. Компании совершенствуют процесс оперирования вагонами за счет повышения качества обслуживания клиентов, внедрения информационных технологий для автоматизации тривиальных задач и сокращения дистанции между участниками процесса перевозок, а также используют инновации в сфере конструирования подвижного состава для обеспечения роста эффективности самого перевозочного процесса. Данные мероприятия можно отнести к категории модернизации, необходимой для продления этапа развития. Для того чтобы избежать перехода на следующий этап стагнации, операторским компаниям необходимо задуматься о диверсификации собственной деятельности и повышении комплексности предоставляемых услуг. Данные задачи позволяют решить применение операционного технологического аутсорсинга [5].

Термин «аутсорсинг» («outsourcing») происходит от английских слов «outside resource using» – «использование внешних ресурсов». В международной бизнес-практике этот термин определяет последовательность организационных решений, суть которых состоит в передаче некоторых ранее самостоятельно реализуемых организацией функций или видов деятельности внешней организации или, как принято говорить, «третьей стороне» [6]. Использование аутсорсинга позволяет компании направить свою деятельность на основной вид бизнеса, перераспределить на него высвободившиеся ресурсы, как финансовые, так и трудовые, занятые ранее в непрофильной деятельности. Это позволит повысить эффективность производства товаров и услуг и их качество. «Основной эффект аутсорсинга должен создаваться за счет того, что специализированная организация обеспечивает более эффективное и качественное исполнение передаваемых ей процессов или функций» [7].

Виды деятельности, которые передают на аутсорсинг, можно обобщенно структурировать в соответствии с материальным и сопутствующими ему сервисным, информационным и финансовым потоками (рисунок 1). На базе данной схемы деления логистических потоков

и степени интеграции логистических компаний в структуру промышленных или торговых предприятий логистических посредников (провайдеров) принято разделять на пять уровней.



Рисунок 1 – Организационная схема видов деятельности промышленных компаний, передаваемых на аутсорсинг

Первые два уровня (1PL и 2PL) предполагают узкую специализацию и незначительный спектр услуг. Операторы третьего уровня способны обеспечить выполнение отдельных бизнес-процессов компании-клиента или движение материального потока на конкретном участке цепочки поставок. Для крупных операторов подвижного состава наиболее перспективным является четвертый уровень, так как предполагает частичную интеграцию посредника в структуру клиента на уровне технического и технологического обеспечения движения материального потока (рисунок 2). Пятый уровень предполагает передачу функций управления не только материальным, но и всеми сопутствующими потоками в цепи поставок.

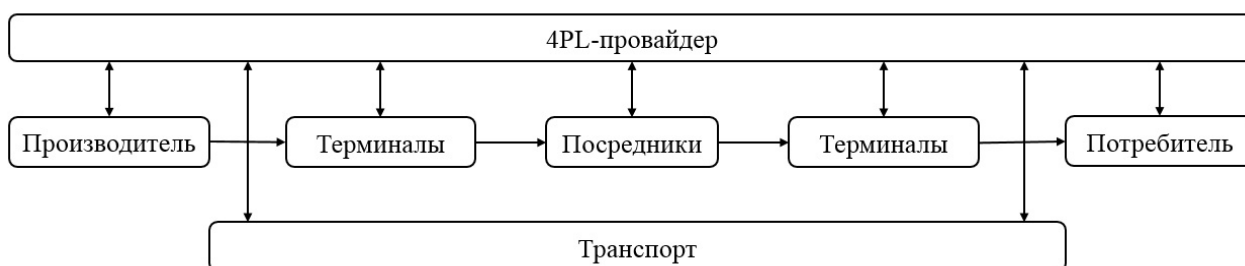


Рисунок 2 – Структура концепции «Управление цепями поставок»

Оценку качества услуг, предоставляемых на транспортном рынке, ежеквартально проводит журнал «РЖД-Партнер». В качестве метода сбора информации используется интервьюирование, в котором принимают участие более ста промышленных предприятий из различных отраслей и регионов страны. Респондентам предлагают оценить деятельность участников транспортного рынка по 11 критериям и 100-балльной шкале. По результатам анкетирования формируется обобщенная оценка удовлетворенности клиентов – индекс качества [8]. Анализ

Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

показателей индекса качества для клиентов отрасли выявил, что практически все из них частично связаны с деятельностью операторских компаний или полностью определяются ею [9]. К факторам, зависящим в большей степени от эффективной работы операторов, можно отнести «стоимость услуг компаний-операторов», «наличие вагонов нужного типа в необходимом количестве» и «техническое состояние вагонов» (рисунки 3, 4).

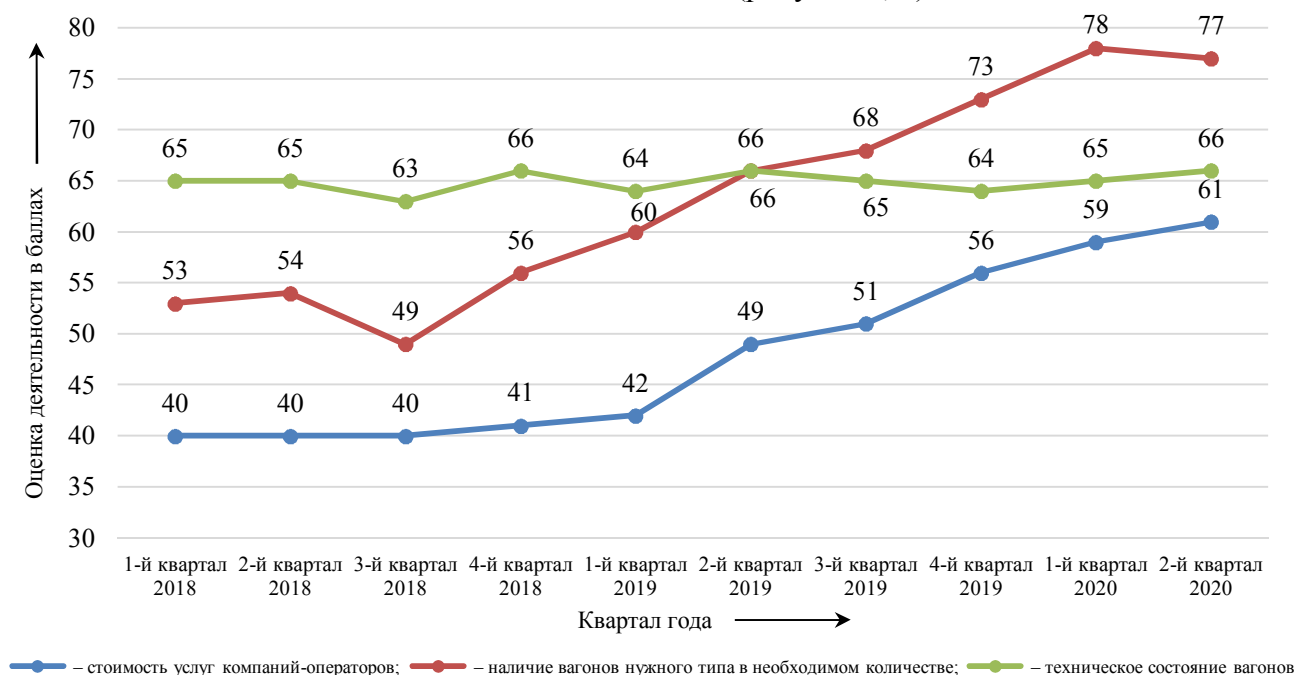


Рисунок 3 – Динамика оценок деятельности операторских компаний на сети железных дорог

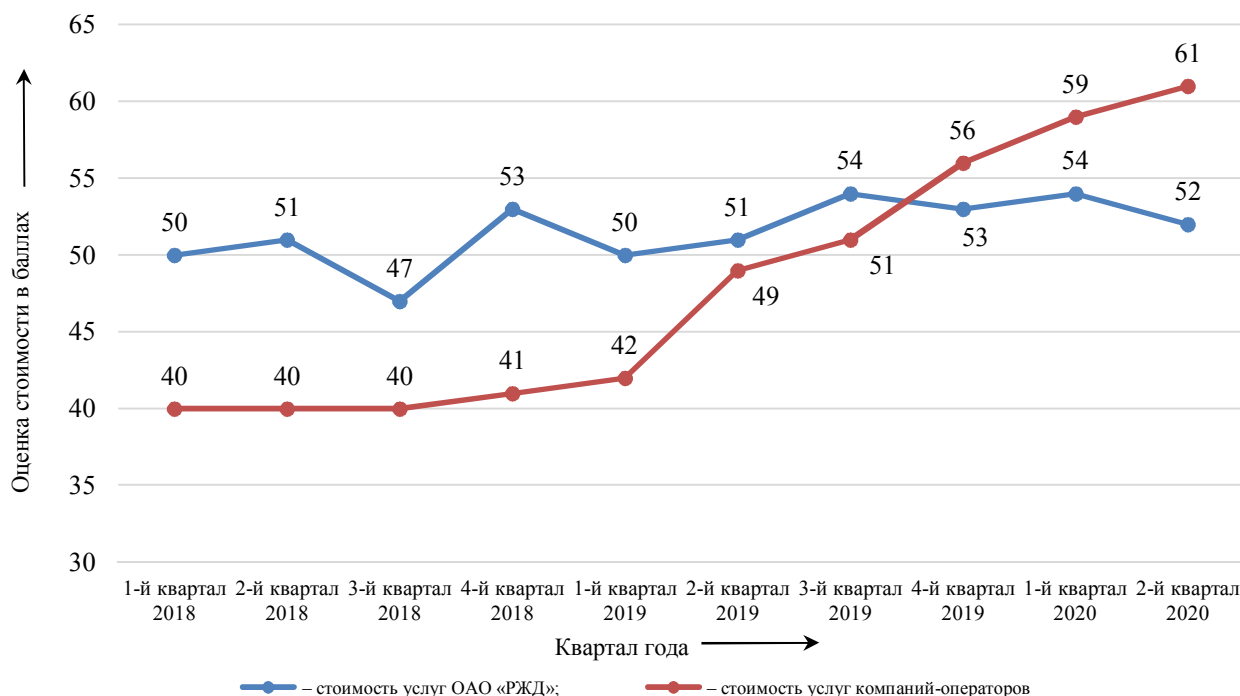


Рисунок 4 – Сравнение оценок стоимости услуг операторов и перевозчика

Анализ оценок стоимости услуг имеет положительную динамику, при этом на первый квартал 2018 г. этот параметр являлся самым неудовлетворительным среди прочих, что было связано с дефицитом парка универсальных вагонов. Данная ситуация возникла как результат

ориентации операторских компаний на снижение издержек в работе с крупными клиентами, поскольку подвижной состав на сети имелся, но практически полностью был занят на кольцевых маршрутах. Помимо этого ситуация осложнялась увеличением доли перевозок угля на экспорт, вследствие чего на остальные перевозки вагонов не оставалось. Данная ситуация длилась вплоть до 2-го квартала 2019 г., когда значительная доля грузоотправителей начали сокращать долю железнодорожного транспорта в собственной структуре перевозок и обратились к альтернативным видам транспорта, в результате ставки у операторов стали постепенно снижаться. В настоящее время удовлетворение клиентов ставками операторов находится на уровне выше среднего.

Наличие вагонов нужного типа в необходимом количестве в своей динамике коррелирует с оценкой стоимости услуг операторов, начиная с конца 2018 г. этот показатель непрерывно растет. В 2020 г. по сравнению с тем же периодом предыдущего года обеспеченность вагонами выросла на 18 пунктов, что характеризуется тем, что на сети железных дорог сократились объемы перевозок и, как следствие, высвободились вагоны.

Техническое состояние вагонов показывает стабильные значения удовлетворенности клиентов, так как компании-операторы следят за своими активами, обеспечивают своевременный ремонт для соответствия ужесточенным требованиям технического состояния подвижного состава.

Различия в динамике оценок на услуги ОАО «РЖД» и компаний-операторов показывает, что процессы ценообразования имеют различные подходы. Удовлетворенность стоимостью услуг перевозчика имеет достаточно стабильные значения независимо от ситуации на рынке, график удовлетворенности стоимостью услуг операторских компаний указывает на зависимость от ситуации на рынке перевозок и большую по сравнению с монополистом клиентоориентированность, проявляющуюся в возможности диалога при установлении цены на вагоны.

Таким образом, в результате проведенного анализа показателей индекса качества оценка деятельности операторских компаний со стороны клиентов по ряду факторов указывает на то, что, начиная с момента возникновения операторской деятельности, вектор целей функционирования компаний-собственников подвижного состава сместился в направлении повышения качества предоставляемых услуг и гибкости при работе с грузоотправителями в условиях неопределенности, существующей на рынке железнодорожных перевозок.

Динамика факторов, связанных с деятельностью операторских компаний, позволяет отметить, что поведение собственников подвижного состава в большей степени определяется конъюнктурой рынка, чем поведением монополиста-перевозчика. Удовлетворенность грузовладельцев обеспечением отправок соответствующим подвижным составом в необходимом количестве показывает, что на сети дорог имеется профицит вагонов. Превышение предложения над спросом приводит к снижению ставок за пользование вагонами, что отражается в положительной динамике оценки стоимости услуг компаний-операторов. В то же время оценка деятельности операторов осуществляется на основе их целевой функции, связанной с оперированием подвижным составом, при этом незначительный рост факторов, связанных с качественными показателями подвижного состава, таких как техническое состояние вагона, говорит о том, что экстенсивный путь удовлетворения спроса грузовладельцев практически исчерпал свои резервы. При этом в практике логистики имеется тенденция повышения комплексности предлагаемых опций для клиентов, но в индексе качества нет соответствующего пункта. Данная ситуация говорит о том, что методологические подходы к диверсификации операторской деятельности и возможности оценки перспектив от нее на данном этапе практически не проработаны.

Особенностью современного этапа развития транспортно-логистических систем на железнодорожном транспорте является необходимость организации совместной работы большого количества участников с разнообразным набором функционального инструментария, используемого для реализации поставленных целей. Требуется рассмотрение теоретических исследований в сфере организации работы операторских компаний. В работе [10] одним из направле-

ний развития логистических операторов рассматривается создание единого органа управления в лице логистического центра для координации деятельности на сети. Предполагается создание двухуровневой системы, первый уровень которой будет выполнять роль органа координации, а второй уровень – функциональный – будет обеспечивать реализацию линейных функций и операций. Структура данного предложения схожа со структурной организацией концепции «Управления цепями поставок» (Supply Chain Management, SCM) (см. рисунки 2, 5). Однако в отличие от 4PL-провайдеров в «Управлении цепями поставок» логистический центр не предполагает интеграции в технологию продвижения материального потока, а лишь осуществляет координирование взаимодействия всех участников перевозочного процесса на сети дорог.

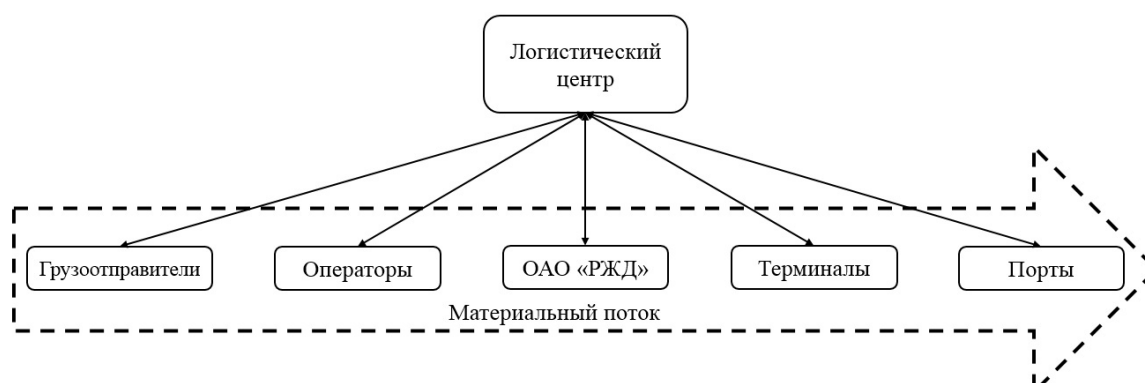


Рисунок 5 – Структура концепции «Логистического центра»

Основной целью создания координационного логистического центра является сокращение порожних пробегов вагонов, так как в доленом соотношении оплата порожнего пробега для предоставления вагона клиенту составляет около 50 % всех эксплуатационных расходов. Для этого потребуются организация прочных управленческих взаимосвязей, взаимоиспользование активов участников и высококачественная информационно-техническая поддержка.

Другой вариант развития операторской деятельности рассмотрен в работе [11]. Предлагается произвести консолидацию вагонного парка собственников подвижного состава и на базе технологического аутсорсинга. В качестве бизнес-процесса для передачи на аутсорсинг выступает процесс оперирования подвижным составом. Основной функцией операторских компаний в таком случае становится коммерческая деятельность по работе с клиентами. В работе рассматривается несколько вариантов реализации предложения, отличительной особенностью каждого является исполнитель роли компании-аутсорсера. Передача в управление всех вагонов перевозчику имеет ряд преимуществ, так как тот является владельцем инфраструктуры и способен обеспечить максимальное сокращение порожних пробегов грузовых вагонов, но при этом существует риск снижения ставки для собственников подвижного состава или возврат к монополии в сфере грузовых перевозок. Консолидация всего вагонного парка под управлением крупного оператора подвижного состава для управления им, но сохранения функции контроля за использованием вагонов за собственниками-клиентами позволит в меньшей степени сократить порожние пробеги, но сохранит условия для конкуренции на рынке. В работе проведен анализ результатов организационно-экономического эксперимента по консолидации парка вагонов различных операторов и передачи его под управление ОАО «РЖД», который показал, что на востребованность услуги технологического аутсорсинга влияет ряд факторов, среди которых и наличие пакета дополнительных услуг.

В качестве новой альтернативы вариантам развития рынка, в которых операторским компаниям предлагается передать профильное направление деятельности координирующему органу или перевозчику и тем самым утратить контроль за собственными активами, в настоящей работе предлагается поэтапная интеграция в структуру компании-клиента и внедрение технологического аутсорсинга со стороны операторов подвижного состава, т. е. проведение диверсификации видов услуг компании. Клиентами при этом могут выступать крупные промыш-

ленные предприятия и другие собственники подвижного состава. Базовым вариантом технологического аутсорсинга может выступить развитие организации взаимодействия операторской компании и промышленного предприятия с собственной железнодорожной инфраструктурой (подъездными путями и рабочим парком вагонов).

Алгоритм постепенного перехода к технологическому аутсорсингу можно представить в несколько этапов:

на первом этапе происходит определение потребностей клиента и возможностей аутсорсера посредством взаимодействия промышленного предприятия с оператором. При этом осуществляется удовлетворение спроса клиента в подвижном составе. Преимущества данного этапа возникают при заключении долгосрочных контрактов, клиент получает гарантированные объемы в подвижном составе перемещения и реализации собственного материального потока, а оператор – регулярный контракт и стратегическое сотрудничество с ключевым клиентом;

на втором этапе осуществляется расширение спектра услуг логистического провайдера за счет передачи ему функций подачи-уборки вагонов с подъездных путей собственника и обратно, а также осуществления маневровой работы на территории клиента – промышленного предприятия. Для собственника путей необщего пользования обеспечивается сокращение участников в цепочке договорной работы и перемещения грузов, что упрощает процесс отправки и взаиморасчетов за перевозку. Для оператора это возможность полноценного контроля за собственными активами, что позволит ему сохранять техническое состояние подвижного состава на необходимом уровне, совершенствование менеджмента операторской компании;

третий этап предполагает передачу функций управления железнодорожной инфраструктурой предприятия при сохранении прав собственности за компанией-клиентом – управленческий технологический аутсорсинг. Это приведет к сокращению эксплуатационных расходов клиента за счет применения передовых технологических решений и методов, а также использования опыта и высокой квалификации работников операторской компании. Возможность управления элементами инфраструктуры клиента позволит начать функциональную интеграцию в систему предприятия и даст возможность операторам более эффективно использовать подвижной состав с точки зрения критерия времени нахождения вагона под грузовыми операциями;

на последнем этапе происходит технологическая, функциональная, финансовая и информационная интеграция операторской компании в технологические процессы промышленного предприятия – полноценный технологический аутсорсинг, заключающийся в полной передаче логистических функций операторской компании. Ускоряются процессы информационного и финансового взаимодействия, что в свою очередь ускоряет технологический цикл перевозки – оборот вагона. Это благоприятно сказывается как на грузовладельце, так как меньший оборот вагона свидетельствует о сокращении времени нахождения груза (иммобилизованных денежных средств) в пути, так и для оператора, так как сокращение технологического цикла приводит к повышению эффективности производства и росту прибыли.

Таким образом, полный логистический аутсорсинг может представляться промышленной компании при полном финансово-экономическом и технологическом доверии к компании-оператору.

Анализ деятельности операторских компаний и научной литературы показал, что развитие операторских компаний рассматривается с точки зрения целевой функции таких компаний, т. е. изучение и развитие технологии оперирования подвижным составом посредством технологического аутсорсинга. Кроме этого направления существует возможность диверсификации деятельности, которая эффективно дополнит основную услугу. Диверсификация предлагает включение дополнительных услуг в перечень уже предоставляемых. Учитывая строгую клиентоориентированность, предлагается работать с клиентом на этапе формирования вагонопотоков на предприятии, т. е. предложить технологический аутсорсинг управления железнодорожными активами и железнодорожной инфраструктурой как крупных промышленных предприя-

тий, так и обслуживающих предприятий сети. К преимуществам данного подхода для операторских компаний стоит отнести увеличение роли операторских компаний на рынке железнодорожных перевозок за счет интеграции с грузообразующими центрами. Кроме этого интеграция в структуру клиентской компании позволит повысить точность прогнозов и эффективность стратегического планирования и, как следствие, позволит оптимизировать расходы. Преимуществами для клиента являются снижение расходов на транспортные операции за счет опыта и современных технологий специализированного провайдера, высвобождение управленческих мощностей и возможность их перераспределения на профильные и актуальные проекты предприятия.

Список литературы

1. О Программе структурной реформы на железнодорожном транспорте: Постановление Правительства Российской Федерации от 18.05.2001 № 384 (ред. от 22.07.2009). – Текст : непосредственный // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2001. – № 23. – Ст. 2366.
2. Инвесторам. Центр результатов. Отчетность / АО «Первая грузовая компания» : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://pgkweb.ru/investors/centre-results/> (дата обращения: 26.11.2020).
3. О компании / АО «Федеральная грузовая компания» : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://railfgk.ru/about/> (дата обращения: 26.11.2020).
4. Годованый, К. А. Перспективы развития транспортного бизнеса на рынке операторов подвижного состава / К. А. Годованый, О. В. Муленко. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. – Т. 2. Технические и экономические науки. – С. 45 – 48.
5. Мамаев, Э. А. Модели структурного развития транспортного холдинга / Э. А. Мамаев, М. В. Колесников. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. – 2012. – № 4. – С. 28 – 30.
6. Аникин, Б. А. Аутсорсинг и аутстаффинг: высокие технологии менеджмента : учебное пособие / Б. А. Аникин, И. Л. Рудая. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Инфра-М, 2017. – 330 с. – (Высшее образование: Бакалавриат). – www.dx.doi.org/10.12737/24214. – ISBN 978-5-16-102993-0. – Текст : электронный. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/770810> (дата обращения: 26.11.2020).
7. Лапидус, Б. М. Аутсорсинг как одно из приоритетных направлений в реформировании и повышении эффективности российских железных дорог. Деятельность тендерной комиссии ОАО «РЖД» / Б. М. Лапидус. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2006. – № 2. – С. 40 – 44.
8. Спецпроекты. Индекс качества услуг на железнодорожном транспорте / Деловой журнал «РЖД-Партнер» : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://www.rzd-partner.ru/specials/indeks-kachestva-uslug-na-zh-d-transporte/> (дата обращения: 26.11.2020).
9. Мамаев, Э. А. Методические аспекты оценки рынка операторской деятельности на железнодорожном транспорте / Э. А. Мамаев, К. А. Годованый. – Текст : непосредственный // Транспорт и логистика: пространственно-технологическая синергия развития : сборник научных трудов междунар. науч.-практ. конф. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. – С. 184 – 187.
10. Экономика и логистика управления вагонными парками компаний-операторов : монография / Д. С. Бельницкий [и др.]. – Самара : Самарский государственный университет путей сообщения, 2009. – 177 с. – Текст : непосредственный.
11. Кубрак, Н. А. Экономическая оценка консолидации парка грузовых вагонов : специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством» : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Кубрак Наталья Александровна ; Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2017. – 180 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *O Programme strukturnoj reformy na zheleznodorozhnom transporte, Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 18.05.2001 g. № 384 (red. ot 22.07.2009)* (On the Program of Structural Reform in Railway Transport: Resolution of the Government of the Russian Federation No. 384 of May 18, 2001 (as amended on July 22, 2009)). Moscow, Collection of legislation of the Russian Federation, 2001, no. 23, art. 2366.
2. AO «Pervaja Gruzovaja Kompanija» (JSC «First Freight Company»), Available at: <https://pgkweb.ru/investors/centre-results/> (accessed 26 November 2020).
3. AO «Federal'naja Gruzovaja Kompanija» (JSC «Federal Cargo Company»). Available at: <https://railfgk.ru/about/> (accessed 26 November 2020).
4. Godovanyj K. A., Mulyuk O. V. Perspectives of transport business development in the rolling stock operators market [Perspektivy razvitiya transportnogo biznesa na rynke operatorov podvizhnogo sostava]. *Sbornik nauchnyh trudov «Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo»: v 4 chastyakh* (Collection of scientific papers «Transport: science, education, production»: in 4 parts). – Rostov-on-Don, 2019, vol. 2, pp. 45 – 48.
5. Mamaev Ye. A., Kolesnikov M. V. Models of structural development of a transport holding [Modeli strukturnogo razvitiya transportnogo holdinga]. *Transport: nauka, tehnika, upravlenie – Transport: science, technology, management*, 2012, no. 4, pp. 28 – 30.
6. Anikin B. A. *Autsorsing i autstaffing: vysokie tehnologii menedzhmenta* (Outsourcing and outstaffing: high management technologies). Moscow: INFRA-M, 2017, 330 p, Available at: <https://znanium.com/catalog/product/770810> (accessed 26 November 2020).
7. Lapidus B. M. Outsourcing as one of the priority directions in reforming and increasing the efficiency of Russian railways. Activity of the tender commission of JSC «Russian Railways» [Autsorsing kak odno iz prioritetnyh napravlenij v reformirovanii i povyshenii jeffektivnosti Rossijskikh zheleznyh dorog. Dejatel'nost' tendernoj komissii OAO «RZhD»]. *Zheleznodorozhnyj transport – Railway transport*, 2006, no. 2, pp. 40 – 44.
8. *Delovoj zhurnal «RZHD-Partner»* (RZD-Partner magazine). Available at: <https://www.rzd-partner.ru/specials/index-kachestva-uslug-na-zh-d-transporte/> (accessed 26 November 2020).
9. Mamaev Ye. A., Godovanyj K. A. Methodological aspects of assessing the market of operator activity in railway transport [Metodicheskie aspekty ocenki rynka operatorskoj dejatel'nosti na zheleznodorozhnom transporte]. *Sbornik nauchnyh trudov IV mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Transport i logistika: prostranstvenno-tehnologicheskaja sinergija razvitiya»* (Collection of scientific papers of the IV international scientific and practical conference «Transport and logistics: spatial and technological synergy of development»). – Rostov-on-Don, 2020, pp. 184 – 187.
10. Bel'nickij D. S., Kotljarenko A. F., Kurenkov P. V., Levchenko A. S., Tarasova T. M. *Jekonomika i logistika upravlenija vagonnymi parkami kompanij-operatorov* (Economics and logistics of managing the freight car fleet of operating companies). Samara: Samara State Transport University Publ., 2009, 177 p.
11. Kubrak N. A. *Jekonomicheskaja ocenka konsolidacii parka Грузовых вагонов* (Economic assessment of the consolidation of the freight car fleet). Ph. D. thesis, Novosibirsk, Siberian Transport University, 2017, 180 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Годованый Кирилл Александрович

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС).

Ростовского Стрелкового Полка Народного Опол-
чения пл., д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская
Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Godovany Kirill Aleksandrovich

Rostov State Transport University (RSTU).

2, sq. Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo
Opolcheniya, Rostov-on-Don, 344038, the Russian Fed-
eration.

Аспирант, старший преподаватель кафедры «Логистика и управление транспортными системами», РГУПС.

Тел.: +7 (928) 988-53-30.

E-mail: godcorp@yandex.ru

Колесников Максим Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения пл., д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Экономика и менеджмент», РГУПС.

Тел.: +7 (863) 272-64-05.

E-mail: em@kaf.rgups.ru

Postgraduate student, senior lecturer of the department of Logistics and Transport Systems Management, RSTU.

Phone: +7 (928) 988-53-30.

E-mail: godcorp@yandex.ru

Kolesnikov Maxim Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU).

2, sq. Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya, Rostov-on-Don, 344038, the Russian Federation.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of the department «Economics and Management», RSTU.

Phone: +7 (863) 272-64-05.

E-mail: em@kaf.rgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Годованый, К. А. Технологический аутсорсинг как инструмент развития рынка операторских компаний / К. А. Годованый, М. В. Колесников. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 97 – 107.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Godovany K. A., Kolesnikov M. V. Technological outsourcing as a tool for market development of operator companies. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 3 (43), pp. 97 – 107 (In Russian).

УДК 656.223.2:656.078.11

Р. Г. Король, М. В. Нечипорук

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
г. Хабаровск, Российская Федерация

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ ПОРОЖНЕГО ВАГОНОПОТОКА НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Национальной программой социально-экономического развития Дальнего Востока на период до 2024 года и на перспективу до 2035 года [1], утвержденной 24 сентября 2020 г., предусмотрена модернизация транспортной инфраструктуры Восточного полигона «Российских железных дорог», в 2021 г. провозная способность которых должна составить 144 млн т, а к 2025 г. провозная способность будет увеличена до 182 млн т. Кроме того, программой предусмотрены реализация мероприятий по увеличению производственных мощностей дальневосточных морских портов и мероприятия по развитию Арктического региона и Северного морского пути как конкурентоспособного межконтинентального транспортного коридора для перевозки грузов между портами стран Азиатско-Тихоокеанского региона и Европейского союза. Для обеспечения пропуска перспективных объемов грузопотока необходимо решить вопросы, препятствующие эффективному функционированию дальневосточных транспортных узлов. В настоящее время железнодорожная инфраструктура транспортных узлов имеет максимальную загрузку. В 2018 г. выгрузка вагонов, прибывших в составе маршрутных поездов, на припортовых станциях Дальневосточной железной дороги составила 994,46 тыс. вагонов, при этом погрузка составила 426,88 тыс. вагонов. Такая диспропорция в объемах погрузки и выгрузки грузов приводит к скоплению на припортовых станциях Восточного полигона железных дорог большого количества порожнего подвижного состава, который необходимо отправить под погрузку на станции западного направления. Высвободившийся подвижной состав занимает пути станции и порта, тем самым затрудняя выполнение маневровой работы и ограничивая возможности станции по приему груженых вагонов. Целью данного исследования является разработка предложений по организации работы с порожним вагонопотоком на Восточном полигоне железных дорог. При этом требуется решить следующие задачи: проанализировать объемы работы станций и дальневосточных морских портов, технологию взаимодействия всех участников перевозочного процесса, разработать мероприятия по организации работы регионального логистического центра с порожними вагонами, определить экономическую эффективность рассматриваемых мероприятий.

Важными направлениями работы регионального логистического центра Дальневосточной железной дороги являются совершенствование технологии работы с высвободившимся подвижным составом и организация транспортно-логистической системы по ускоренному возврату порожних полувагонов на станцию по-

грузки. В данной работе представлена организационная схема взаимодействия операторов подвижного состава и управляющих подразделений ОАО «РЖД» для регулирования движения порожнего подвижного состава. Для повышения эффективности оперирования вагонным парком необходимо организовать оперативный обмен информацией между различными собственниками подвижного состава, региональным логистическим центром Восточного полигона и станцией выгрузки, которая должна консолидировать вагонопоток для формирования специальной порожнего маршрута. Завершением исследования является определение потенциальной экономической эффективности сокращения оборота вагонов маршрутного поезда на направлении следования «станция Находка-Восточная – станции погрузки Восточно-Сибирской, Западно-Сибирской и Красноярской железных дорог».

Ключевые слова: транспортный узел, транспортная логистика, подвижной состав железнодорожного транспорта.

Roman G. Korol, Marina V. Nechiporuk

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

LOGISTICS SOLUTIONS FOR THE REGULATION OF EMPTY CAR TRAFFIC ON THE EASTERN RAILWAY POLYGON

Abstract. The national program of socio-economic development of the Far East in the period to 2024 and a term until 2035 [1], approved September 24, 2020, provides for the modernization of the transport infrastructure of the Eastern site of "Russian Railways", in 2021 carrying capacity which should reach 144 million tons and by 2025, capacity will be increased to 182 million tons. In addition, the program provides for the implementation of measures to increase production capacity of the far Eastern seaports and development activities in the Arctic region and the Northern sea route as competitive Intercontinental transport corridor for cargo between the ports of the Asia-Pacific region and the European Union. to ensure the passage of promising volumes of cargo traffic, it is necessary to resolve issues that hinder the effective functioning of the far eastern transport hubs. Currently, the railway infrastructure of transport hubs has a maximum load. In 2018, the unloading of cars that arrived as part of block trains at the port stations of the Far Eastern Railway amounted to 994.46 thousand cars, while loading amounted to 426.88 thousand cars. Such a disparity in the volume of loading and unloading of goods leads to the accumulation of a large number of empty rolling stock at the port stations of the Eastern Polygon of railways, which must be sent for loading at the stations of the western direction. the released rolling stock occupies the tracks of the station and the port, thereby making it difficult to perform shunting work and limiting the station's ability to receive loaded cars. The purpose of this study is to develop proposals for the organization of work with empty car traffic at the eastern railway landfill. This requires to solve the following tasks: to analyze the workloads of the stations and the far Eastern sea ports interaction technology to all the traders in the transportation process, to develop actions on the organization of work of the regional logistics center with the empty wagons, to determine the economic efficiency of the activities.

An important areas of work of the regional logistics center of the Far Eastern Railway is to improve the technology of working with the released rolling stock and the organization of a transport and logistics system for the accelerated return of empty gondola cars to the loading station. This paper presents an organizational scheme of interaction between rolling stock operators and management units of Russian Railways to regulate the movement of empty rolling stock. To improve the efficiency of operating the car fleet, it is necessary to organize an operational exchange of information between various owners of rolling stock, the regional logistics center of the Eastern polygon and the unloading station, which should consolidate the car traffic to form a special empty route. the conclusion of the study is to determine the potential economic efficiency of reducing the turnover of block train cars in the direction of «nakhodka-vostochnaya station-loading stations of the east siberian, west siberian and krasnoyarsk railways».

Keywords: transport hub, transport logistics, railway rolling stock.

Согласно долгосрочной программе развития ОАО «РЖД» до 2025 г. предусмотрены мероприятия по увеличению провозной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей до 180 млн т к 2024 г. [2]. При этом в 2018 г. объем железнодорожных перевозок грузов в адрес морских портов Дальнего Востока России составил 99 млн т, прирост – 6 % к показателям 2017 г. Через дальневосточные порты в основном экспортируются уголь (около 47 %), нефть и нефтепродукты (25 %). Программа развития Восточного полигона железных дорог включает в себя несколько этапов, на первом этапе планируется увеличение объемов перевозки угля на экспорт до 125 млн т, и к 2025 г. поставки угля должны достигнуть 195 млн т.

По итогам 2018 г. портами Дальневосточного бассейна было перегружено 200,5 млн т груза, что на 4,5 % больше грузооборота 2017 г. Среднесуточная погрузка вагонов в адрес станций Дальневосточной железной дороги в 2018 г. достигла 6370 вагонов и превысила уровень 2017 г. на 144 вагона (рисунок 1).

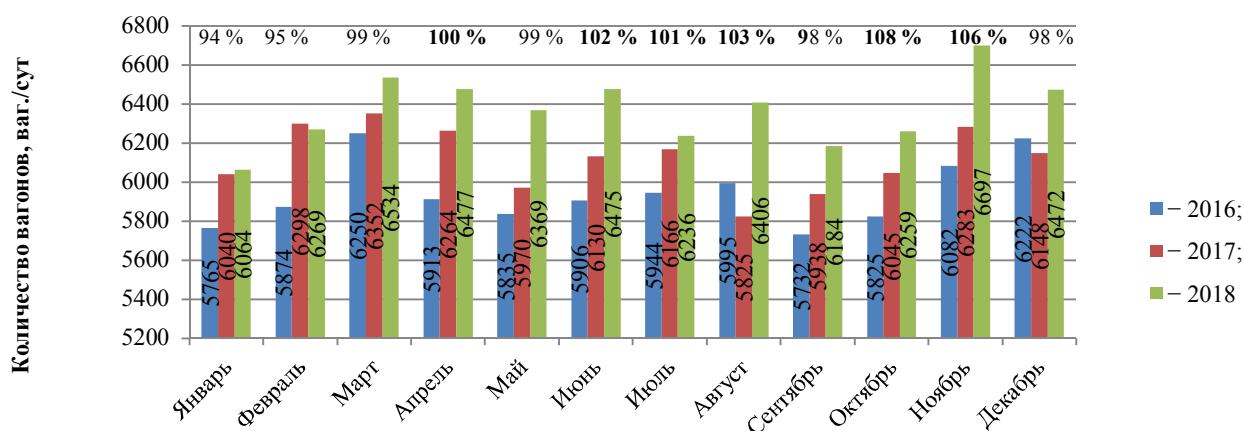


Рисунок 1 – Погрузка вагонов в адрес Дальневосточной железной дороги (среднесуточное количество вагонов) в 2016 – 2018 гг.

В 2018 г. происходило превышение установленного технического плана погрузки в основном в период ограничения пропускной способности полигона из-за проведения летних путевых работ. Максимальное перевыполнение плана погрузки в 108 % отмечено в октябре 2018 г., было принято к перевозке на 495 вагонов свыше норм, установленных ОАО «РЖД».

Основными станциями погрузки в адрес Дальневосточной дороги являются Западно-Сибирская, Восточно-Сибирская и Красноярская железные дороги (рисунок 2). Кузбасский регион Западно-Сибирской железной дороги обеспечивает большую часть погрузки каменного угля в адрес дальневосточных портов для перевалки на морские суда и дальнейшей отправки в страны Азиатско-Тихоокеанского региона. В общей массе перевозок основу составляют каменный уголь (62 %) и нефтеналивные грузы (15 %).

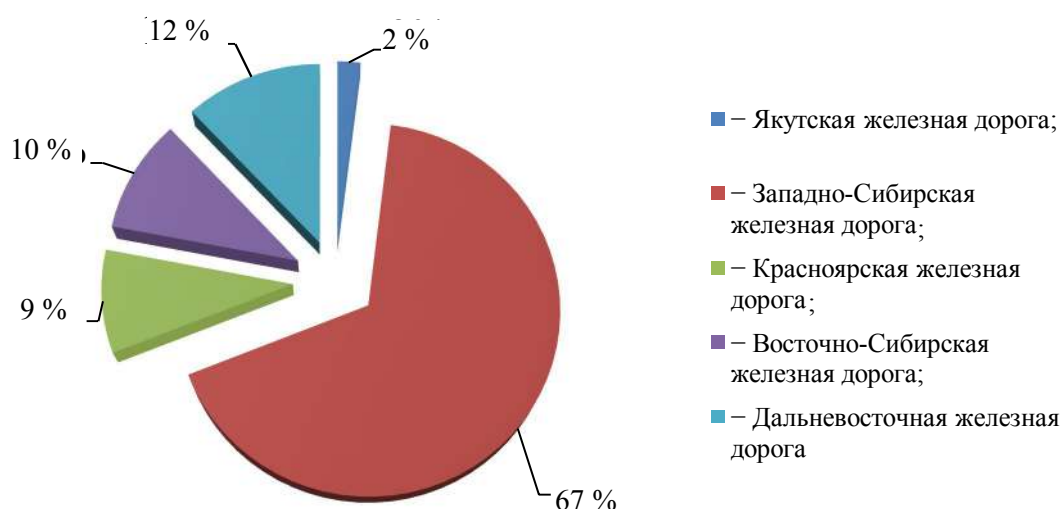


Рисунок 2 – Погрузка на станциях железных дорог в адрес Дальневосточной железной дороги

В 2018 г. погрузка в полувагоны на Дальневосточной железной дороге составила 426,88 тыс. вагонов, в то же время выгрузка вагонов, прибывших в составе маршрутных поездов, на припортовых станциях Дальневосточной железной дороги составила 994,46 тыс.

вагонов. Такая диспропорция в объемах погрузки и выгрузки (таблица 1) подвижного состава приводит к скоплению на припортовых станциях Восточного полигона большого количества порожних полувагонов, которые необходимо отправить под погрузку на станции Западно-Сибирской, Красноярской, Восточно-Сибирской железных дорог. В условиях возрастающих объемов перевозок в направлении дальневосточных портов основной проблемой становится возврат высвобождаемых из-под выгрузки порожних вагонов на станции погрузки.

Таблица 1 – Объемы погрузки и выгрузки основных припортовых станций Дальневосточной железной дороги

Станция	Наименование показателя	2015		2016		2017		2018	
		год	сутки	год	сутки	год	сутки	год	сутки
Владивосток	Погрузка (ваг.)	44301	121	46516	127	54020	148	53436	147
	Выгрузка (ваг.)	57955	159	60853	167	92345	253	72834	200
Ванино	Погрузка (ваг.)	19949	54	20075	55	16945	46	15046	41
	Выгрузка (ваг.)	351340	963	384646	1054	375396	1028	378242	1036
Находка-Восточная	Погрузка (ваг.)	56840	156	49701	136	50142	138	54326	149
	Выгрузка (ваг.)	497526	1363	510341	1395	510680	1396	521863	1430

Концентрация грузопотоков в направлении Ванинско-Совгаванского и Восточно-Находкинского транспортных узлов (рисунок 3), на которые приходится 85 % экспортной выгрузки, привела к максимальной загрузке прилегающих железнодорожных участков, пропускные способности Транссиба и БАМа практически исчерпаны.

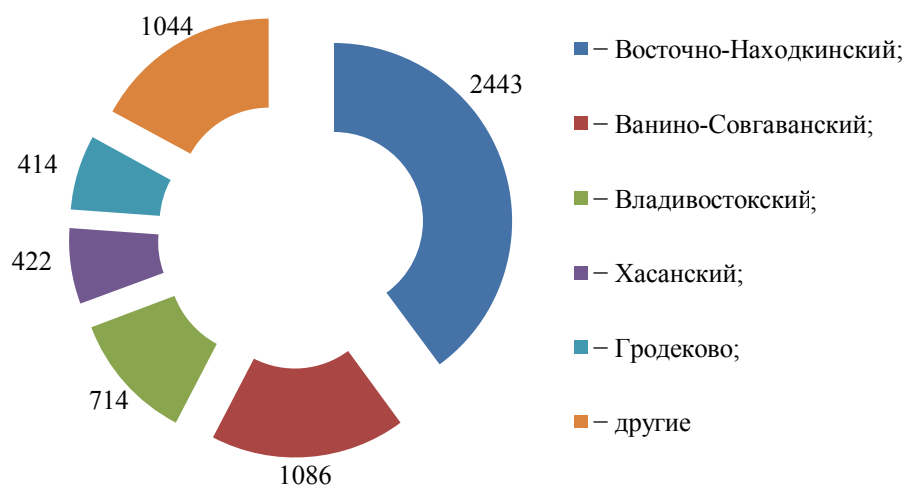


Рисунок 3 – Среднесуточная выгрузка вагонов с распределением по дальневосточным транспортным узлам в 2018 г.

В соответствии с распоряжением Правительства РФ № 877-р «О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» от 17 июня 2008 г. [3], с учетом интенсивного развития портовых мощностей прогнозируется двукратное увеличение объемов перевозок грузов железнодорожным транспортом к портам Приморского края (рисунок 4).

Значительный рост грузопотоков ожидается и в адрес портов Хабаровского края, особенно на подходах к припортовым станциям Ванино-Совгаванского транспортного узла, с загрузкой Байкало-Амурской магистрали [4, 5]. Объемы перевозимых грузов в направлении дальневосточных портов к 2030 г. могут достигнуть 70 млн ткм/км. Это связано прежде всего с освоением новых угольных месторождений в северных регионах Дальнего Востока России (Хабаровский край, Республика Саха (Якутия)), планируемым строительством новых угольных терминалов («Порт Дальний», компания «А-Проперти»), увеличением перерабатывающих мощностей существующих угольных терминалов и строительством новых причальных комплексов в портах Ванинского транспортного узла, а также переориентацией Транссибирской магистрали на контейнерные и пассажирские перевозки [6].

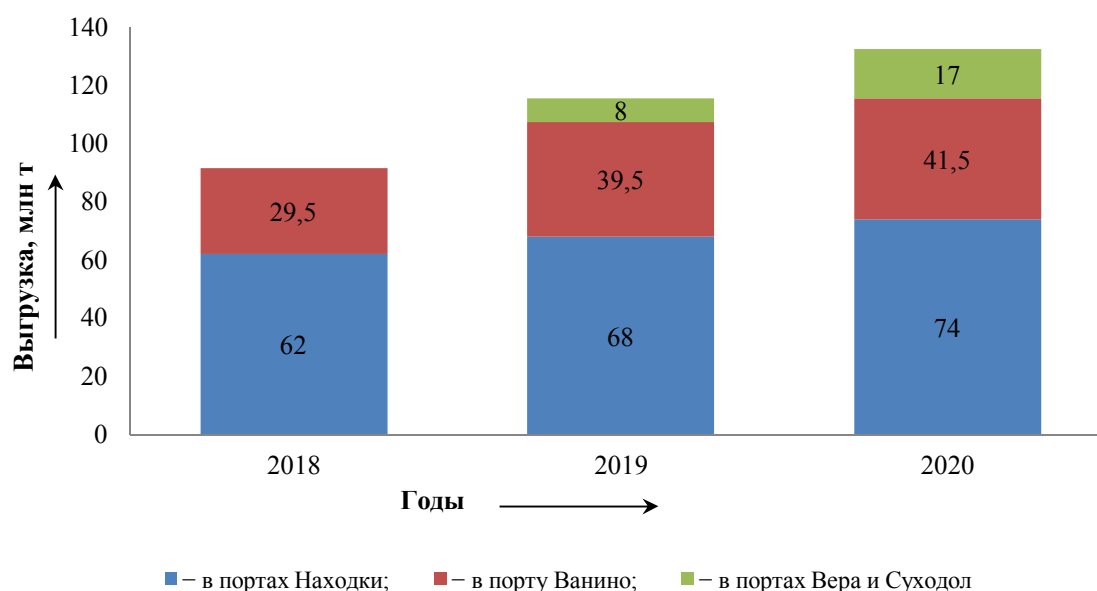


Рисунок 4 – Прогноз выгрузки в портах Дальнего Востока на 2020 г.

Дальневосточная железная дорога является основным экспортером сырьевых грузов в направлении стран Азиатско-Тихоокеанского региона. Для ускорения доставки внешнеторговых грузов, сокращения маневровой работы по расформированию и формированию составов, снижения себестоимости перевозок на станции погрузки организуются прямые маршруты с углем назначением на припортовые станции Дальневосточной железной дороги (рисунок 5), маршрутизация отправок в 2018 г. составила 74 %.

В настоящее время основной грузовой вагонопоток в адрес припортовых станций поступает маршрутными поездами, а обратно, с учетом принадлежности подвижного состава различным операторам, поступает в переработку на узловые железнодорожные станции. Внеклассная сортировочная станция Восточного полигона железной дороги Хабаровск II обеспечивает максимальный объем переработки вагонопотока. Имеющихся технических устройств и железнодорожных путей на станции Хабаровск II недостаточно для приема возрастающего вагонопотока [7]. Горочный интервал четной сортировочной горки станции Хабаровск II составляет 22,3 мин, нечетной сортировочной горки – 21,7 мин. При таком горочном интервале на сортировочных горках возможен роспуск не более двух поездов в час.

По данным, опубликованным на официальном сайте ОАО «РЖД», в 2019 г. в адрес морских портов Восточного полигона ОАО «РЖД» было отгружено экспортного угля порядка

86 млн т, рост погрузки составил 7,1 % относительно 2018 г. В связи с постоянно растущими объемами погрузки кузбасского угля на экспорт происходит увеличение порожнего вагонопотока, движущегося в западном направлении, и при наличии ограничений в развитии инфраструктуры возникают технологические отказы станции Хабаровск II в переработке увеличивающегося вагонопотока, что приводит к появлению брошенных составов на подходах к пунктам сортировки вагонов.

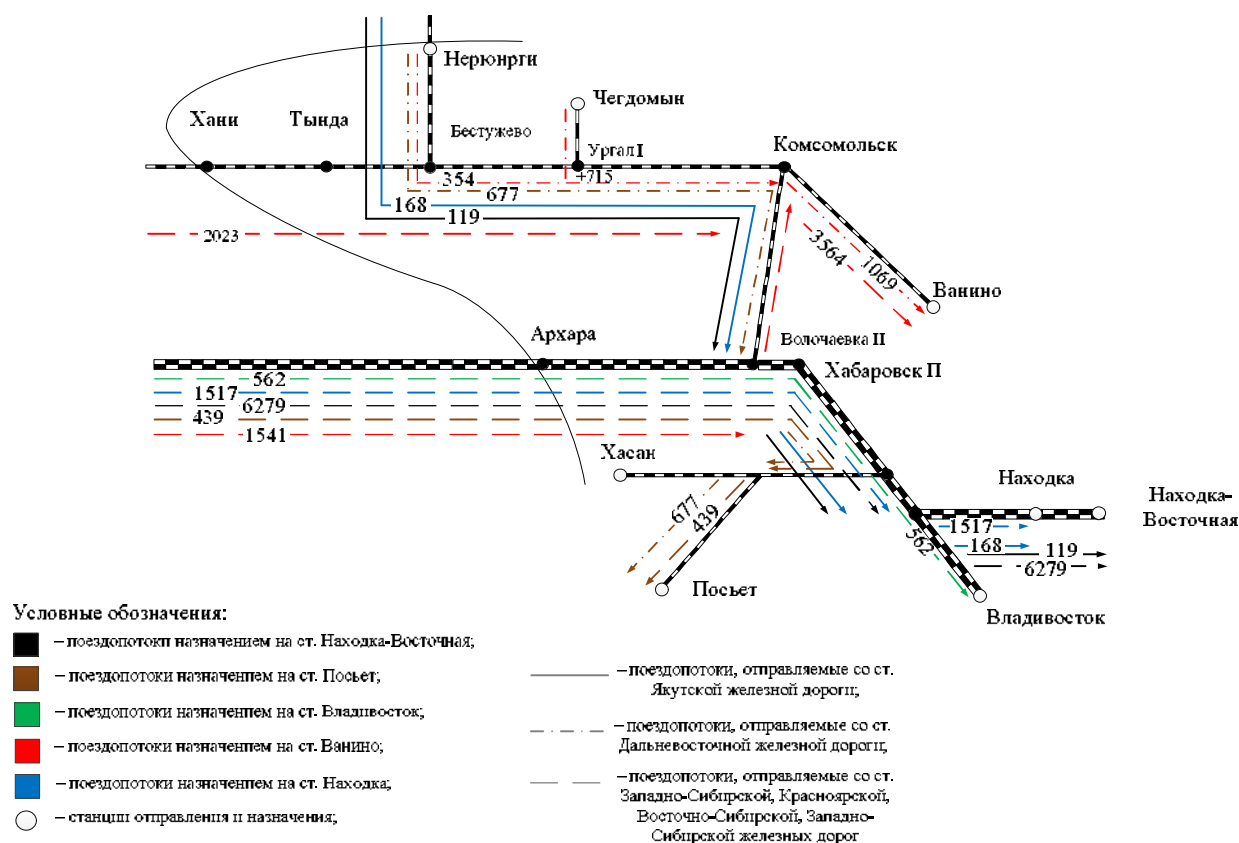


Рисунок 5 – Схема продвижения угольных маршрутных поездов

В 2018 г. было отставлено от движения 3530 поездов (28 % от общего количества) назначением на припортовые станции Дальнего Востока [8]. Распределение количества брошенных поездов по регионам Дальневосточной железной дороги представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Распределение количества отставленных от движения поездов по регионам Дальневосточной железной дороги

Регион	Количество отставленных от движения поездов
Тындинский регион	1214
Владивостокский регион	977
Комсомольский регион	779
Хабаровский регион	560
Итого	3530

На увеличение оборота вагонов, в том числе, влияет выпуск на железнодорожную сеть нового подвижного состава, наличие на сети железных дорог в среднем 50 тыс. вагонов увеличивают вагонооборот на 19 ч. К 2025 г. прирост активного парка вагонов составит 82,6 тыс. полувагонов по отношению к 2019 г., при этом простаивающий парк полувагонов достигнет к 2020 г. порядка 27 тыс. единиц [9].

Показатели мероприятий, заложенных в отраслевых нормативно-правовых документах, не отражают запросы грузоотправителей по планируемым объемам перевозок грузов с развитием инфраструктуры железнодорожного транспорта. В долгосрочной программе развития ОАО «РЖД» до 2025 г. [2] заложены следующие цифры – средняя скорость доставки грузов в 2018 г. составляет 385 км в сутки и должна увеличиться к 2025 г. до 420 км в сутки. При этом в оптимистичных отраслевых программных документах не отражены вопросы, касающиеся соотношения темпов развития транспортной инфраструктуры и роста объема перевозок грузов. Учитывая лимитированные провозные и пропускные способности железнодорожной инфраструктуры, важным направлением работы регионального Логистического центра Восточного полигона железных дорог является формирование транспортно-логистической цепи движения подвижного состава «станция погрузки – станция выгрузки – станция погрузки» для ускорения процесса возврата порожнего вагонопотока [10].

Повысить эффективность оперирования вагонным парком можно путем организации оперативного обмена информацией между различными собственниками подвижного состава, региональным логистическим центром железной дороги и железнодорожными станциями погрузки и выгрузки грузов при формировании порожнего маршрута, что позволит обеспечить концентрацию вагонопотока на станции, необходимого для отправки специальными порожними маршрутами [11]. Прибытие на станцию погрузки таких специальных технических маршрутов с порожними вагонами и централизованная их подача на грузовой фронт предприятий ускоряют выполнение операций с подвижным составом и повышают эффективность технологии работы для грузоотправителей, в свою очередь это обеспечивает оператору подвижного состава конкурентное преимущество на рынке транспортно-логистических услуг.

Для организации и последующей отправки со станции технических маршрутных составов с порожними вагонами, во-первых, необходимо установить, на каких путях станции будут формироваться эти маршруты. Если маршрутные поезда с порожними вагонами будут отправляться на станции погрузки с путей морского порта, то необходимо, чтобы оператор подвижного состава заключил с морским портом договор на отправительскую маршрутизацию. Согласно условиям такого договора вагоны после выгрузки накапливаются на путях морского порта и отправляются в составе специального маршрута, который следует до станций погрузки без переработки в пути. Во-вторых, необходимо внедрить технологию взаимодействия собственников подвижного состава по регулированию адресного назначения порожних вагонов, которая заключается в отсортировке технически неисправных порожних вагонов различных собственников подвижного состава с накоплением таких вагонов на станции и отправкой в вагоноремонтное депо. Из технически исправных вагонов формируется транзитный порожний маршрут назначением на согласованную станцию с оформлением необходимых перевозных документов. Данная технология позволяет консолидировать небольшую группу компаний операторов подвижного состава с выделением ответственного работника одной из них в роли диспетчера, который принимает предварительные решения по переадресовке в пути следования маршрута, предоставляет операторам из консолидированной группы информацию о необходимости переадресовки. Главным участником в отправительской маршрутизации порожних вагонов является логистический центр, который планирует объемы отправки маршрутных составов с припортовых станций и путей морского порта.

Информация о выгруженных вагонах поступает с припортовой станции в Дальневосточный региональный логистический центр через «АСУ Станций» [12]. В Логистическом центре составляется план отправки маршрутных поездов с порожними вагонами, этот план доводится до операторов подвижного состава. Операторы оформляют заявку на перевозку порожних вагонов (ГУ-12) и отправляют заявку в Дорожный территориальный центр фирменного транспортного обслуживания (ЦФТО). После этого Логистический центр направляет припортовой станции задание на формирование и отправку маршрутных поездов. Такие маршрутные поезда следуют до станции назначения, минуя пункты переработки. Если в пути

следования потребуется выполнить переадресовку подвижного состава, то оформлением заявлений на переадресовку, передачей запроса в Логистический центр о возможности переадресовки занимается ответственное лицо группы операторов (диспетчер). Диспетчер уведомляет операторов подвижного состава, вагоны которых следуют в составе запрашиваемого на переадресовку маршрутного поезда, о необходимости оформления заявлений на переадресовку, формирует полный комплект документов (заявления всех собственников), готовит обобщенное заявление на переадресовку и передает данные документы в ЦФТО. После согласования переадресовки Логистический центр передает оперативный приказ на задержку поезда на выбранной станции и переадресовку.

Организационная схема принятия решений по регулированию подвижного состава представлена на рисунке 6.

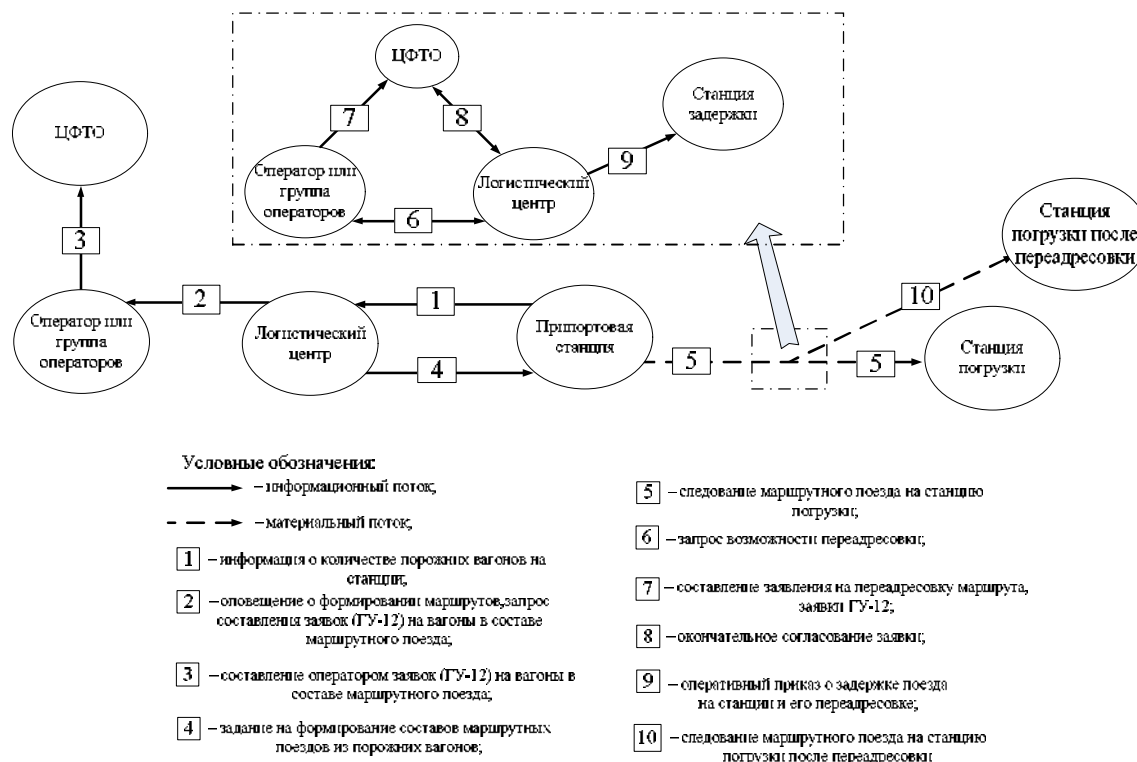


Рисунок 6 – Организационная схема принятия решений по регулированию подвижного состава

Минимизация количества подвижного состава на сети железных дорог является актуальным вопросом, так как наблюдается существенная диспропорция в объемах выгрузки и погрузки. Высвободившийся подвижной состав занимает пути станции и порта, тем самым затрудняя выполнение маневровой работы и ограничивая возможности станции по приему груженых вагонов. Эффективность перевозки основана, в том числе, на использовании минимального количества подвижного состава. Сокращение рабочего парка вагонов на станции возможно за счет уменьшения времени оборота вагона. Это комплексный показатель, включающий в себя время в движении в груженом и порожнем состоянии, время нахождения на станциях пути следования. Этот показатель обуславливает доходность перевозочной работы и для оператора подвижного состава является важнейшим фактором эффективности.

Ускорение оборота вагона – одно из основных направлений сокращения операторских эксплуатационных расходов. Ускорение оборота вагона возможно за счет сокращения времени нахождения вагонов под различными технологическими и техническими операциями, в том числе в ожидании выполнения этих операций. Применение логистических решений по регулированию вагонного парка в виде формирования и отправки специальных порожних маршрутов с припортовых станций, которые будут следовать транзитом, минуя пункты сор-

тировки, позволит сократить время простоя вагона под переработкой на станциях пути следования маршрутного поезда [13].

Экономическая эффективность ускорения оборота вагонов определяется уменьшением затрат на производство подвижного состава и снижением эксплуатационных расходов на содержание подвижного состава. При сокращении оборота вагона можно получить дополнительные доходы от предоставления в аренду высвободившегося подвижного состава. Потенциальная экономическая эффективность сокращения оборота вагонов одного маршрутного поезда составом 65 вагонов представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Экономическая эффективность ускорения оборота вагонов

Маршрут	Изменение оборота вагона, сут	Экономия эксплуатационных расходов на содержание подвижного состава, млн руб. в год.	Экономия капитальных вложений в подвижной состав, млн руб.	Дополнительный доход от предоставления в аренду подвижного состава, млн руб. в год.
Ерунаково – Находка-Восточная – Ерунаково	0,71	20,027	147,68	42,112
Станции Западно-Сибирской железной дороги – Находка-Восточная – Станции Западно-Сибирской железной дороги	1,15	32,433	239,2	68,210
Станции Восточно-Сибирской железной дороги – Находка-Восточная – Станции Восточно-Сибирской железной дороги	1,42	40,005	295,36	84,223
Станции Красноярской железной дороги – Находка-Восточная – Станции Красноярской железной дороги	1,39	39,201	289,12	82,444

В 2020 г. во многих странах мира из-за введенных ограничений в условиях распространения COVID-19 произошло значительное снижение спроса на товары, многие предприятия были остановлены, и, как следствие, отмечено сокращение грузооборота и объема оказываемых транспортно-логистических услуг. В настоящее время транспортно-логистические цепи поставки товаров между Азией и Европой восстанавливаются, порядка 90 % промышленных предприятий Китая [15] восстановили свои мощности и для восполнения упущенной прибыли будут наращивать объемы производства и потребления сырья. Возрастет транспортная загрузка дальневосточных припортовых железнодорожных станций и морских портов, произойдет увеличение объемов выгрузки грузов, значит, и увеличение количества порожнего подвижного состава, что в свою очередь может привести к снижению качества оказания транспортно-логистических услуг.

Региональный Логистический центр Восточного полигона на фоне растущих объемов перевозок стремится обеспечить уменьшение числа вагонов, находящихся в отставленных от движения поездах, на подходах к припортовым станциям Дальневосточной железной дороги, не менее чем на 5 % к уровню предшествующего года [14]. Организация единого информационно-аналитического диспетчерского центра операторов подвижного состава позволит сформировать устойчивый информационный обмен с региональным Логистическим центром Восточного полигона железных дорог и в реальном времени решать возникающие технологические, технические и организационные вопросы.

Согласно поставленной цели и задачам в данной работе можно сделать следующие выводы.

1. Анализ объемов работы основных припортовых станций Дальневосточной железной дороги и морских портов показал устойчивый рост грузооборота, при этом существует значительная диспропорция в объемах погрузки и выгрузки подвижного состава, что приводит к скоплению на припортовых станциях Восточного полигона большого количества порожних полувагонов. В 2018 г. было отставлено от движения 3530 поездов (28 % от общего количества) назначением на припортовые станции Дальнего Востока [8]. Поэтому основной проблемой становится возврат высвобождаемых из-под выгрузки порожних вагонов на станции погрузки. Организация единого информационно-аналитического диспетчерского центра операторов подвижного состава позволит оперативно решать вопросы по регулированию подвижного состава на сети железных дорог.

2. Представленная организационная схема взаимодействия структур при регулировании порожнего подвижного состава разработана для увеличения маршрутизации отправок составов из порожних вагонов. Прибытие на станцию погрузки специальных технических маршрутов с порожними вагонами и централизованная их подача на грузовой фронт предприятий ускоряет выполнение операций с подвижным составом и повышает эффективность технологии работы для грузоотправителей, в свою очередь это обеспечивает оператору подвижного состава конкурентное преимущество на рынке транспортно-логистических услуг. Внедрение мероприятий по регулированию подвижного состава, а именно отправление с припортовых станций порожних вагонов в маршрутных поездах, проходящих транзитом без переработки пункты сортировки, позволит ускорить оборот вагонов за счет сокращения времени простоя транзитного вагона с переработкой.

3. Экономическая эффективность ускорения оборота подвижного состава включает в себя экономию эксплуатационных расходов на содержание подвижного состава, экономию капитальных вложений в подвижной состав, увеличение доходов оператора за счет высвобождения подвижного состава. В данной работе представлена потенциальная экономическая эффективность сокращения оборота вагонов одного маршрутного поезда.

Список литературы

1. Об утверждении Национальной программы социально-экономического развития Дальнего Востока на период до 2024 года и на перспективу до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2020 г. № 2464-р. – Текст : электронный. – URL: <http://static.government.ru/media/files/> (дата обращения: 03.11.2020).

2. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р. – Текст : электронный. – URL: <http://static.government.ru/media/files/> (дата обращения: 03.11.2020).

3. О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 17 июня 2008 № 877-р. – Текст : электронный. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_92060/ (дата обращения: 03.11.2020).

4. Ларина, И. В. Управление качеством работы транспортного узла с учетом эксплуатационных характеристик / И. В. Ларина, А. Н. Ларин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 1 (37). – С. 130 – 141.

5. Король, Р. Г. Оценка пропускной способности Ванинского транспортного узла с помощью имитационного моделирования / Р. Г. Король, Е. И. Гарлицкий. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 3 (35). – С. 144 – 155.

6. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р. – Текст : электронный. – URL: <https://www.mintrans.ru/documents/7/1009> (дата обращения: 03.11.2020).

7. Нечипорук, М. В. Исследование возможностей развития железнодорожных станций северного широтного хода восточного полигона БАМа в связи с планируемым увеличением объемов перевозок / М. В. Нечипорук, Е. И. Гарлицкий, Е. Э. Червотенко, А. Р. Калинина. – Текст : непосредственный // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2013. – № 3. – С. 46 – 55.

8. Король, Р. Г. Взаимодействие различных видов транспорта в транспортном узле при наличии терминала «сухой порт» (на примере Владивостокского транспортного узла) : специальность 05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Король Роман Григорьевич ; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 2015. – 22 с. – Текст : непосредственный.

9. Федорович, В. О. Управление приватными порожними вагонами / В. О. Федорович, Н. А. Кубрак, Т. В. Федорович // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 8. – С. 68 – 70.

10. Лахметкина, Н. Ю. Технологические решения управления груженными и порожними пробегами / Н. Ю. Лахметкина, А. М. Макарова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 1 (41). – С. 114 – 122.

11. Фролова, О. В. Влияние технологии возврата порожних вагонов на станции погрузки на показатели их использования / О. В. Фролова, В. В. Широкова, Т. Н. Каликина. – Текст : непосредственный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2019. – № 1 (18). – С. 38 – 40.

12. Федорович, В. О. Цифровая трансформация управления грузовыми перевозками при использовании вагонов частного парка / В. О. Федорович, Т. В. Федорович. – Текст : непосредственный // Экономика железных дорог. – 2020. – № 2. – С. 53 – 70.

13. Савчук, В. Б. Подходы к разработке перспективной модели управления парками порожних вагонов / В. Б. Савчук, И. В. Терешко. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2014. – № 1 (50). – С. 21 – 23.

14. Исследование вопроса формирования порожних отправительских маршрутов на припортовых станциях полигона Дальневосточной железной дороги / О. В. Фролова, И. В. Мельник [и др.]. – Текст : непосредственный // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2019. – Т. 1. – С. 102 – 104.

15. Логистические тренды 2020 – 2021 года: влияние пандемии COVID-19 на перевозки / статьи портала ритейлеров и поставщиков Retail.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.retail.ru/articles/logisticheskie-trendy-2020-2021-goda-vliyanie-pandemii-covid-19-na-perevozki/> (дата обращения: 03.11.2020).

References

1. *Rasporjazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 24 sentjabrja 2020 g. № 2464-r «Ob utverzhdenii Nacional'noj programmy social'no-jekonomicheskogo razvitija Dal'nego Vostoka na period do 2024 goda i na perspektivu do 2035 goda»* (Order of the Government of the Russian Federation No. 2464-R «On approval of the National program of socio-economic development of the Far East for the period up to 2024 and for the future up to 2035»), Moscow, Government of the Russian Federation, 2020, 128 p.

2. *Rasporjazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 19 marta 2019 g. № 466-r «Dolgosrochnaja programma razvitija otkrytogo akcionernogo obshhestva "Rossijskie zheleznye dorogi" do 2025 goda»* (Order of the Government of the Russian Federation No. № 466-R «Long-term development program of the open joint stock company "Russian Railways" until 2025»), Moscow, Government of the Russian Federation, 2019, 135 p.

3. *Rasporjazhenie Pravitel'stva RF ot 17 ijunja 2008 N 877-r «O Strategii razvitija zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federacii do 2030 goda»* (Order of the Government of the Russian Federation No. № 877-R «On the strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030»), Moscow, Government of the Russian Federation, 2008, 174 p.

4. Larina I. V., Larin A. N. Manage quality of work of transport node given operating characteristic [Upravlenie kachestvom raboty transportnogo uzla s uchetom jekspluatacionnyh karakteristik]. *Izvestija Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 1 (37), pp. 130 – 141.
5. Korol' R. G., Garlickij E. I. Assessment of capacity of the vanino transport hub by means of imitating modelling [Ocenka propusknoj sposobnosti Vaninskogo transportnogo uzla s pomoshh'ju imitacionnogo modelirovanija]. *Izvestija Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 3 (35), pp. 144 – 155.
6. *Rasporjazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 22 nojabrja 2008 goda № 1734-r «Transportnaja strategija rossijskoj federacii na period do 2030 goda»* (Order of the Government of the Russian Federation No. № 1734-R «Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 »), Moscow, Government of the Russian Federation, 2008, 496 p.
7. Nechiporuk M. V., Garlickij E. I., Chervotenko E. Je., Kalinina A. R. Study of possibilities of railway stations development of northern latitudinal eastern polygon of the BAM in connection with the planned increase of traffic volumes [Issledovanie vozmozhnostej razvitiya zheleznodorozhnyh stancij severnogo shirotnogo hoda vostochnogo poligona BAMA v svjazi s planiruемым uvelicheniem ob'emov perevozok]. *Bjulleten' Ob'edinennogo uchenogo soveta OAO RZhD – Bulletin of the joint academic Council of Russian Railways*, 2013, no. 3, pp. 46 – 55.
8. Korol' R. G. Vzaimodeistvie razlichnykh vidov transporta v transportnom uzle pri nalichii terminala «sukhoi port» (na primere Vladivostokskogo transportnogo uzla) (The interaction of different modes of transport in transport in the presence of the terminal «dry port» (on the example of Vladivostok transport hub). Ph. D. thesis abstract, Moscow, Moscow Railway State University, 2015, 22 p.
9. Fedorovich V. O., Kubrak N. A., Fedorovich T. V. Management of private empty cars [Upravlenie privatnymi porozhnimi vagonami]. *Zheleznodorozhnyj transport – The Journal of Railway transport*, 2017, no. 8, pp. 68 – 70.
10. Lakhmetkina N. Yu. Makarova A. M. Technological solutions for managing loaded and empty runs [Tehnologicheskie reshenija upravlenija gruzhenymi i porozhnimi probegami]. *Izvestija Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no 1 (41), pp. 114 – 122.
11. Frolova O. V., Shirokova V. V., Kalikina T. N. The impact of the technology of returning empty cars to loading stations to their usage indicators [Vlijanie tehnologii vozvrata porozhnyh vagonov na stancii pogruzki na pokazateli ih ispol'zovanija]. *Transport Aziatsko-Tihookeanskogo regiona – The Journal of Transport in the Asia-Pacific region*, 2019, no. 1 (18), pp. 38 – 40.
12. Fedorovich V. O., Fedorovich T. V. Digital transformation management of freight transportation in the use of private cars park [Cifrovaja transformacija upravlenija gruzovymi perevozkami pri ispol'zovanii vagonov privatnogo parka]. *Jekonomika zheleznyh dorog – The Journal of Railway Economics*, 2020, no. 2, pp. 53 – 70.
13. Savchuk V. B., Tereshko I. V. Approaches to development of an advanced model for managing empty carriage fleets [Podhody k razrabotke perspektivnoj modeli upravlenija parkami porozhnyh vagonov]. *Transport Rossijskoj Federacii – The Journal «Transport of the Russian Federation»*, 2014, no. 1 (50), pp. 21 – 23.
14. Frolova O. V., Mel'nik I. V., Shirokova V. V., Kalikina T. N. Research of the question of formation of empty consignor routes at port stations of the ground of the far east railroad [Issledovanie voprosa formirovanija porozhnyh otpravitel'skih marshrutov na priortovyh stancijah poligona dal'nevostochnoj zheleznoj dorogi]. *Nauchno-tehnicheskoe i jekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke – Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century*, 2019, vol. 1, pp. 102 – 104.
15. *Logisticheskie trendy 2020–2021 goda: vlijanie pandemii COVID-19 na perevozki* (Logistics Trends 2020–2021: Impact of the COVID-19 Pandemic on Transportation), Available at: <https://www.retail.ru/articles/logisticheskie-trendy-2020-2021-goda-vlijanie-pandemii-covid-19-na-perevozki/> (accessed 03 November 2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Король Роман Григорьевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортных процессов и логистика», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-76-28.

E-mail: kingkhv27@mail.ru

Нечипорук Марина Викторовна

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Технология транспортных процессов и логистика», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-76-28.

E-mail: miranaforeverrr@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Korol Roman Grigorievich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Technology of Transport Processes and Logistics», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-76-28.

E-mail: kingkhv27@mail.ru

Nechiporuk Marina Viktorovna

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Senior lecturer of the department «Technology of Transport Processes and Logistics», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-76-28.

E-mail: miranaforeverrr@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Король, Р. Г. Логистические решения по регулированию порожнего вагонопотока на Восточном полигоне железных дорог / Р. Г. Король, М. В. Нечипорук. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 107 – 119.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Korol R. G., Nechiporuk M. V. Logistics solutions for the regulation of empty car traffic on the Eastern railway polygon. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 3 (43), pp. 107 – 119 (In Russian).

УДК 656.212.9

А. И. Шеховцов

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДонИЖТ), г. Донецк, Донецкая Народная Республика

АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ ВАГОНОВ НА ПУТЯХ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА – КЛИЕНТЫ»

Аннотация. Железнодорожные пути необщего пользования и станции примыкания магистрального железнодорожного транспорта являются важнейшими звеньями системы «железная дорога – клиенты», кроме зарождения и погашения вагонопотоков в этих пунктах происходит обмен информацией и документами. При организации взаимодействия необходимо учитывать интересы не только перевозчика и владельца (пользователя) пути необщего пользования, но и владельцев подвижного состава, поэтому наиболее эффективным решением представляется разработка автоматизированной системы управления взаимодействием.

Целью работы является определение факторов, приводящих к простоям вагонов в ожидании выполнения с ними технологических операций, для последующего поиска управляющих решений, направленных на устранение (снижение) негативного влияния на работу системы «железная дорога – клиенты».

Для достижения указанной цели разработана блок-схема алгоритма нахождения вагона на железнодорожных путях необщего пользования, на основании которой выявлены факторы, оказывающие негативное влияние на время простоя вагонов на путях необщего пользования. Предложенный алгоритм является основой для разработки математической модели расчета времени нахождения вагона на путях необщего пользования. Вследствие выявления факторов, негативно влияющих на взаимодействие, нахождение вагонов на пути необщего пользования представлено как объект управления для последующей разработки автоматизированной системы управления взаимодействием станций примыкания и путей необщего пользования, отличающейся комплексным подходом к расчету расходов и рисков всех участников системы «железная дорога – клиенты».

Ключевые слова: станция примыкания, пути необщего пользования, взаимодействие, вагон, простой, факторы влияния, объект управления.

Aleksej I. Shekhovtsov

Donetsk Railway Transport Institute (DRTI), Donetsk, the Donetsk People's Republic

ALGORITHM OF CARS' PRESENCE ON NON-PUBLIC TRACKS AS A BASIS FOR IMPROVING THE QUALITY OF OPERATION OF THE «RAILWAY – CLIENTS» SYSTEM

Abstract. *Non-public railway tracks and junction stations of mainline railway transport are the most important links of the «railway – clients» system. At these points, car traffic is generated and extinguished, as well as information and documents are exchanged. When organizing interaction, it is necessary to take into account the interests of not only the carrier and the owner (user) of the non-public track, but also the owners of rolling stock. The most effective solution is to develop an automated interaction management system.*

The purpose of the work is to determine the factors that lead to idle of cars while waiting for technological operations to be performed with them. This will allow you to find control solutions aimed at eliminating (reducing) the negative impact on the operation of the “railway – clients” system. To achieve this, an algorithm has been developed for the presence of a car on non-public railway tracks, and factors that have a negative impact on the idle of cars on non-public tracks have been identified. The proposed algorithm is the basis for developing a mathematical model for calculating the time spent by a car on non-public tracks. The presence of cars on non-public tracks is presented as a control object for the subsequent development of an automated control system for the interaction of junction stations and non-public tracks. It will have a comprehensive approach to calculating the costs and risks of all participants in the «railway – clients» system.

Keywords: *junction station, non-public tracks, interaction, car, idle time, influencing factors, control object.*

В настоящее время подъездные пути промышленных предприятий являются приоритетными пунктами выполнения грузовой работы железнодорожного транспорта (около 80 % от общего числа грузовых операций). Именно поэтому для повышения качества перевозочного процесса работа с вагонами на подъездных путях (путях необщего пользования) должна быть организована на основе строго регламентируемого взаимодействия в работе путей необщего пользования и станций их примыкания. Обязательными являются разработка и внедрение единой технологии работы с совместной ответственностью за ее результаты. Невозможно сократить время нахождения вагонов на подъездных путях без разработки математических моделей оптимизации планирования и управления взаимодействием грузовой станции и подъездных путей с учетом соответствия технических и технологических возможностей [1].

Взаимодействие станции и подъездных путей относится к сложным технологическим процессам, обладающим целым рядом характерных особенностей, среди которых можно выделить наличие трудно формализуемых факторов, многокритериальность задач управления и необходимость выработки решений в условиях жестких временных ограничений, определяемых реальным ходом технологического процесса. Чаще всего оперативной обстановкой на подъездном пути владеют только приемосдатчики, причем каждый на своем участке. Система оперативного диспетчерского управления основана на вербальных коммуникациях. Координация действий служб железнодорожных цехов между собой и цехами основного производства низка, а информационная система представлена системой учета и отчетности, по факту отражающей итоги эксплуатационной и грузовой работы.

Для учета взаимных интересов станции примыкания и подъездного пути разрабатывают Единые технологические процессы работы железнодорожных путей необщего пользования и станций примыкания (ЕТП), определяющие систему взаимодействия и связывающие в единое целое технологию работы станции магистрального транспорта с технологией выполнения транспортных операций на подъездном пути [2]. При изменении технологии работы на подъездном пути и последующей разработке нового ЕТП значительная часть ветвевладельцев не учитывает современное состояние оперативно-технологических автоматизированных систем управления эксплуатационной и грузовой работой, используемых на станциях примыкания, автоматизированных систем оформления перевозочных документов магистрально-

го железнодорожного транспорта и возможность применения аналогичных автоматизированных систем на подъездном пути [3].

При разработке единой технологии важно оценивать коммерческую эффективность предлагаемых решений для всех участников процесса: промышленного предприятия, железной дороги и собственников подвижного состава. Для каждой стороны должен быть произведен расчет

- затрат, связанных с подвижным составом;
- рисков, вызванных недостаточной надежностью системы (просрочка доставки груза, необеспеченность погрузки, потребность в запасе сырья на колесах и др.);
- тарифных платежей.

Эффективное управление транспортом предприятия требует создания информационной системы, предназначенной прежде всего для контроля состояния и дислокации вагонов и локомотивов на сети предприятия и для электронного документооборота между грузоотправителем, железной дорогой и грузополучателем. Формируемая динамическая модель оперативной ситуации на железнодорожной сети предприятия должна базироваться на автоматическом вводе исходных данных, что позволит обеспечить оперативный персонал реальными данными и прогнозировать развитие оперативной обстановки. Дальнейшим развитием таких систем является переход от информационного уровня к автоматизации оперативного диспетчерского управления на участках технологических перевозок [4]. Интеллектуализация системы взаимодействия станций примыкания и подъездных путей позволит решать следующие задачи [5]:

осуществлять планирование работы каждого участника производственного процесса в реальном масштабе времени на основе прогноза развития ситуации при расхождении плана с фактом;

разрабатывать новые средства контроля технологической дисциплины за счет средств предупреждения нарушений;

внедрять оценку оперативного юридически ответственного информационно-технологического взаимодействия участников ЕТП в рамках сменно-суточного и текущего планирования, исполнения и контроля исполнения утвержденных оперативных планов;

внедрять оперативную пооперационную и процессную финансовую оценку выполняемых технологических процессов;

осуществлять прогнозирование и стоимостную оценку непроизводительных потерь технологических процессов.

Для разработки автоматизированной системы управления взаимодействием станций примыкания и путей необщего пользования (ПНП) необходимо определить факторы, влияние которых может привести к увеличению времени нахождения вагонов на путях необщего пользования. Алгоритм нахождения вагона на железнодорожных путях необщего пользования (рисунок 1) позволяет выявить данные факторы.

На особенности нахождения вагона на путях необщего пользования влияет его принадлежность (приватный вагон или вагон, принадлежащий перевозчику). В статьях [6, 7] предложены формулы для расчета времени нахождения порожних вагонов на станции выгрузки и времени нахождения вагонов в порожнем состоянии в зависимости от их принадлежности. В настоящее время для сети ОАО «РЖД» вопрос принадлежности вагонов не является актуальным, блок-схема, представленная на рисунке 1, разработана для частных вагонов.

При обслуживании путей необщего пользования локомотивом владельца (пользователя) в блоке 32 указаны отцепка и выезд локомотива, а в блоке 35 – заезд локомотива и прицепка, но в зависимости от особенностей работы на путях необщего пользования может быть предусмотрено проведение грузовых операций с вагонами маневрового состава со включенными и опробованными автотормозами, в таком случае отсутствует необходимость проверки наличия локомотива (блок 34). Закрепление группы вагонов на пути тормозными башмаками и их изъятие, а также опробование автотормозов не приведены на блок-схеме, но расчет вре-

мени проведения соответствующих операций, равно как и времени подготовки маршрута (в необходимых случаях), будет приведен в математической модели расчета времени нахождения вагона на путях необщего пользования.

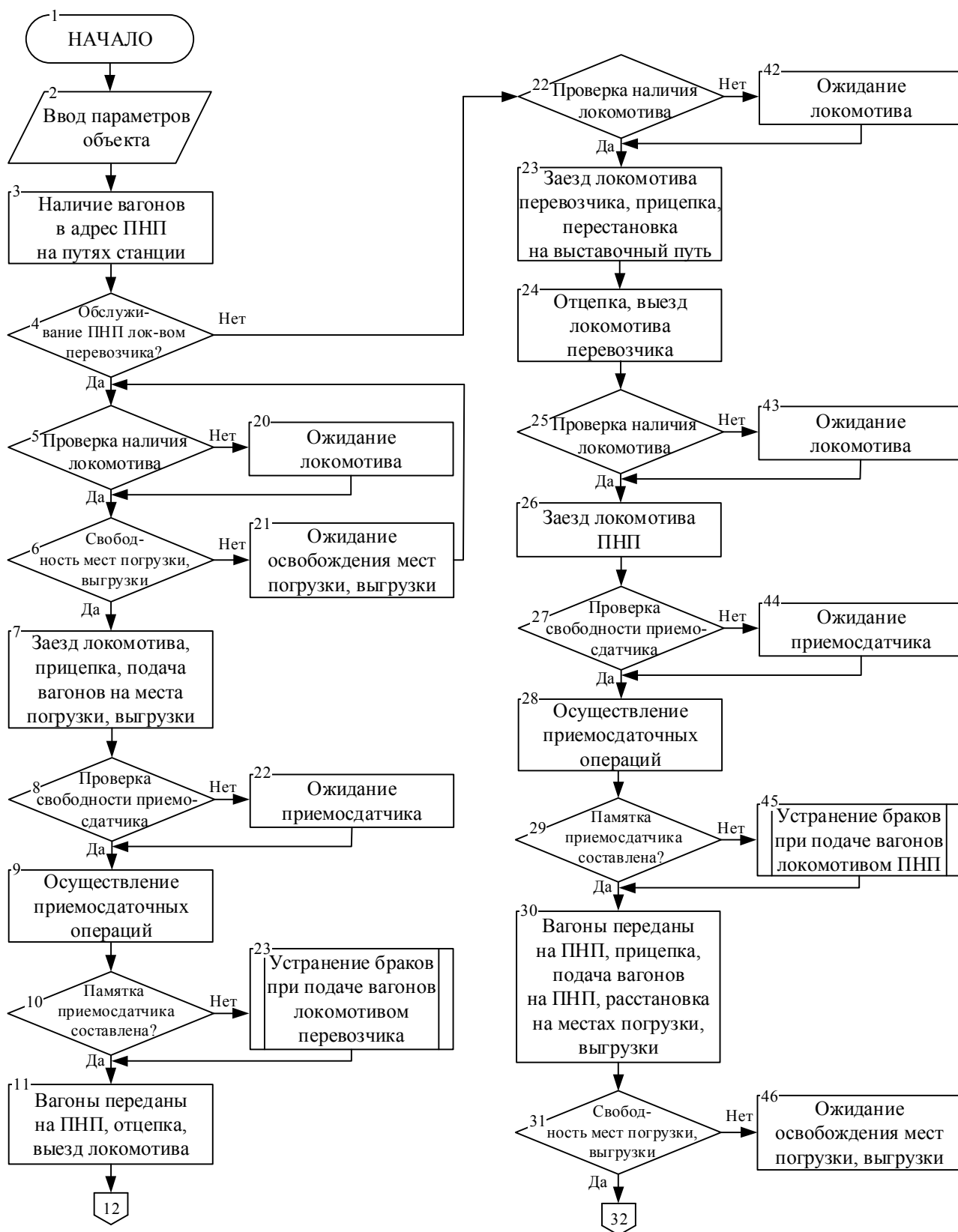


Рисунок 1 – Алгоритм нахождения вагона на железнодорожных путях необщего пользования

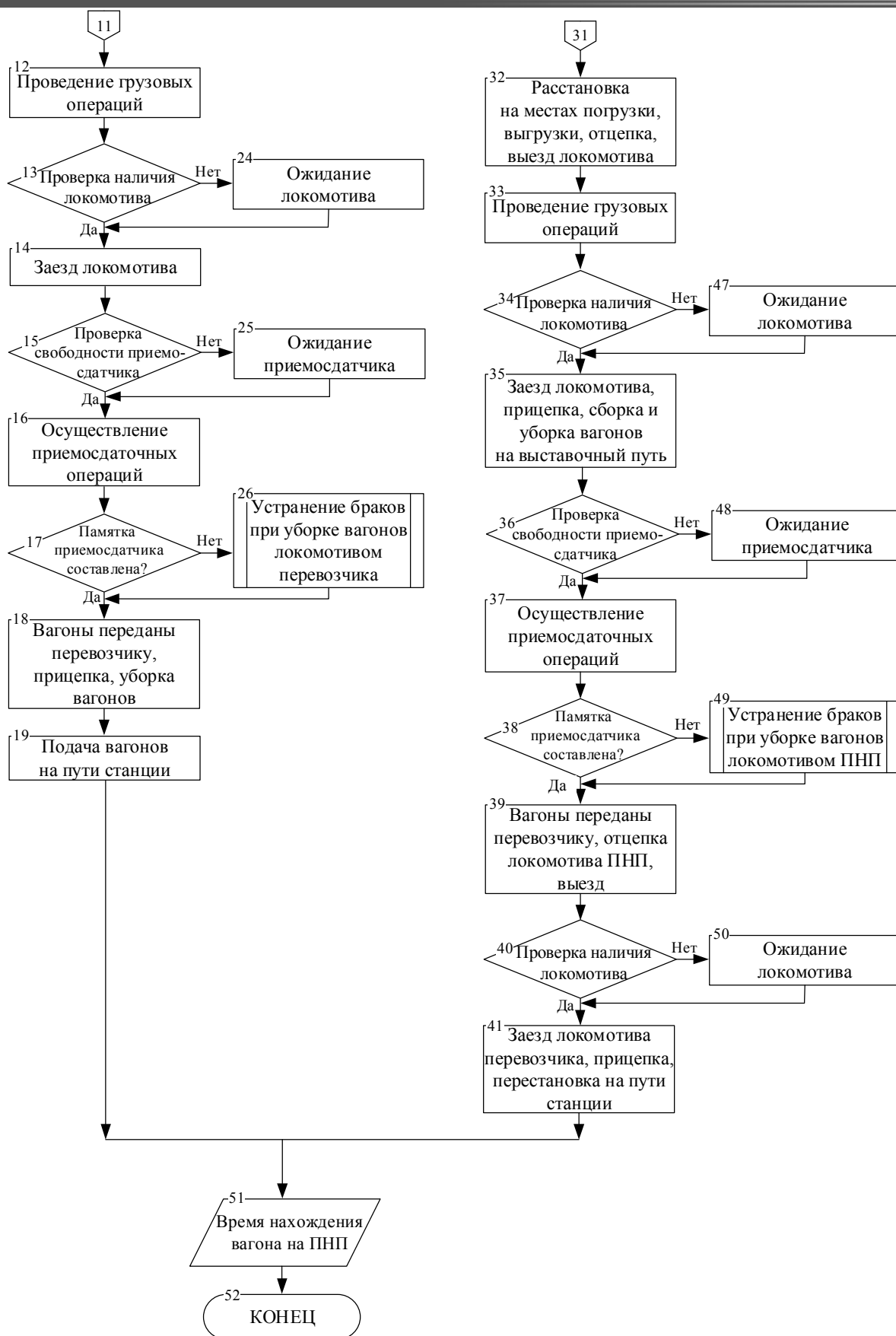


Рисунок 1, лист 2

В блок-схеме, приведенной на рисунке 1, не указаны моменты передачи уведомлений о подаче вагонов и о завершении грузовых операций, поскольку данные моменты влияют на расчет платы за пользование вагонами, а не на расчет времени нахождения вагонов на пути необщего пользования. При возврате порожних вагонов подразумевается также, что соблюдены требования пунктов 68, 69, 72 [8]. В блоках 12 и 33 учтена, в случае необходимости, очистка от остатков грузов кузова вагона, его ходовых частей и межвагонных соединений.

В результате анализа разработанного алгоритма выявлены следующие факторы, способные оказывать негативное влияние на время нахождения вагонов на путях необщего пользования.

1. Занятость локомотива. Простой вагонов в ожидании обработки возможен в случае занятости локомотива, которым вагон должен подавать/убираться или переставляться с пути.

2. Занятость мест погрузки, выгрузки. В зависимости от путевого развития подъездного пути может отсутствовать возможность подачи на него вагонов в связи с занятостью путей (особенно мест погрузки, выгрузки в случае обслуживания подъездного пути локомотивом перевозчика), тогда вагоны будут простаивать в ожидании подачи на выставочном пути или на пути необщего пользования. Данный фактор может быть вызван также недостаточной оснащенностью погрузочно-разгрузочного фронта.

3. Занятость приемосдатчика. Приемосдаточные операции осуществляются в присутствии представителей двух сторон – сдающей и принимающей вагоны, при отсутствии одного из них приемосдаточные операции не могут быть осуществлены.

4. Выявление браков в процессе осуществления приемосдаточных операций. Выявление при проведении приемосдаточных операций браков может приводить к необходимости замены подаваемого под погрузку порожнего вагона, проведения ремонта вагона, проведения дополнительной очистки вагона, выдачи грузов с проверкой, а также к перепробегам локомотивов, в связи с чем данный вопрос требует дополнительной проработки.

5. Ожидание проведения грузовых операций. Вагоны могут простаивать на грузовых фронтах время, превышающее нормативное, в связи с недостаточной производительностью погрузочно-разгрузочных машин или их недостаточным количеством.

На основании выявленных факторов нахождение вагонов на пути необщего пользования представлено как объект управления (рисунок 2).

Целевая функция модели расчета времени нахождения вагонов на пути необщего пользования, которую необходимо минимизировать, в общем случае имеет вид:

$$T_{\text{расч}} = f(n_{\text{в}}, t_{\text{тех}}, t_{\text{гр}}, t_{\text{ком}}, T_{\text{доп}}), \quad (1)$$

где $n_{\text{в}}$ – количество вагонов, ваг.

$t_{\text{тех}}, t_{\text{гр}}, t_{\text{ком}}$ – время выполнения отдельных технических, грузовых и коммерческих операций, ч;

$T_{\text{доп}}$ – дополнительное время нахождения вагонов на пути необщего пользования, приходящееся на межоперационные простои, ч;

$$T_{\text{доп}} = \sum_{i=1}^n t_{\text{ож } i}^{\text{лок}} + \sum_{j=1}^m t_{\text{ож } j}^{\text{гр}} + \sum_{p=1}^k t_{\text{ож } p}^{\text{п/с}} + \sum_{q=1}^l t_{\text{ож } q}^{\text{бр}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{ож } i}^{\text{лок}}$ – время ожидания локомотива, ч;

$t_{\text{ож } j}^{\text{гр}}$ – время ожидания проведения грузовых операций, ч;

$t_{\text{ож } p}^{\text{п/с}}$ – время ожидания осуществления приемосдаточных операций, ч;

$t_{\text{ож } q}^{\text{бр}}$ – время ожидания устранения выявленных браков, ч;

n, m, k, l – количество факторов, оказывающих негативное влияние на время нахождения вагонов на пути необщего пользования.

Каждый из данных факторов может быть оценен на основании применения методов теории систем массового обслуживания или на основании определенной закономерности, полученной в результате статистического анализа результатов выборочных исследований.

В разрабатываемую автоматизированную систему управления должны быть включены элементы поддержки принятия решений оперативного персонала, предложения в данном направлении формулировались для отдельных крупных клиентов железнодорожного транспорта [9], равно как и моделирование работы отдельных подъездных путей [10], но необходима разработка универсальной системы, способной функционировать независимо от местных условий каждого конкретного пути необщего пользования.

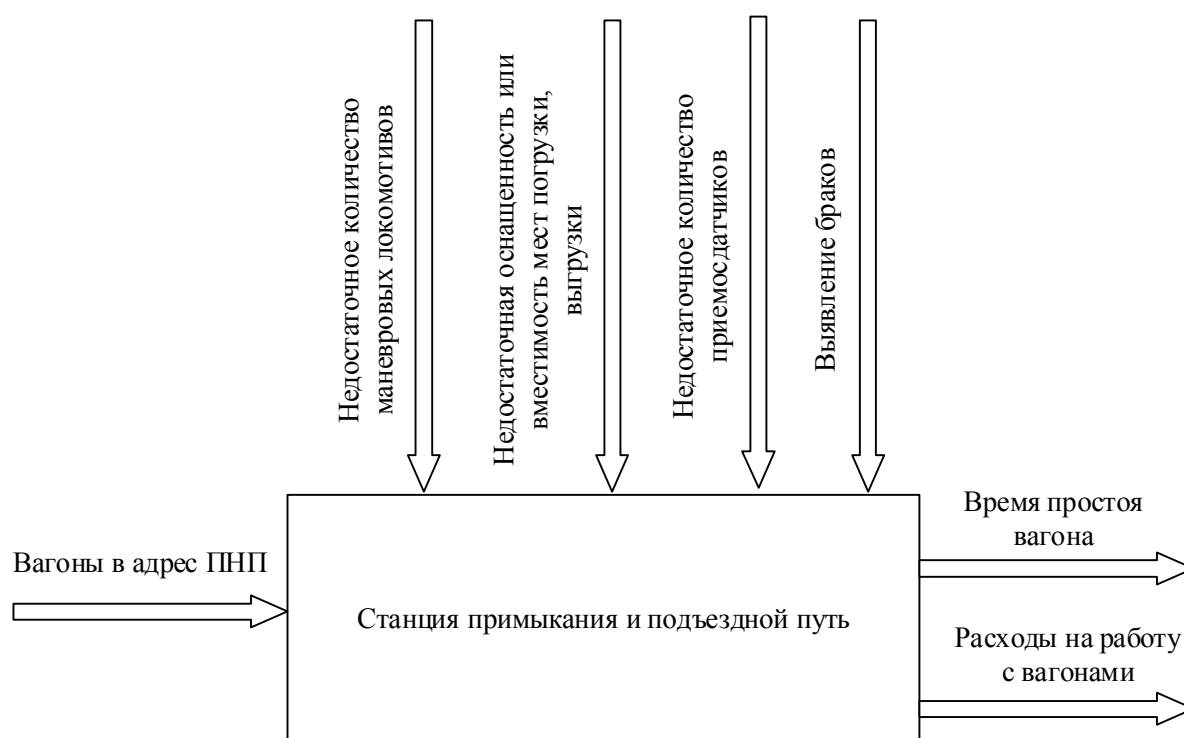


Рисунок 2 – Нахождение вагонов на пути необщего пользования как объект управления

Основной результат функционирования автоматизированной системы управления взаимодействием станций примыкания и путей необщего пользования должен сводиться к выполнению следующих условий:

$$\begin{cases} (T_{\text{факт}} = T_{\text{расч}}) \rightarrow T_{\text{норм}}; \\ \sum_{i=1}^n C_{vi} \rightarrow \sum C_{\min}, \end{cases} \quad (3)$$

где $T_{\text{факт}}$ – фактическое время нахождения вагона на путях необщего пользования, ч;

$T_{\text{норм}}$ – нормативное время нахождения вагона на путях необщего пользования, установленное ЕТП или договором между перевозчиком и владельцем (пользователем) пути необщего пользования, ч;

C_{vi} – расходы на работу с вагонами каждого участника перевозочного процесса, руб.

Таким образом, для повышения эффективности работы системы «железная дорога – клиенты» необходимо выполнить оценку рисков, вызванных выявленными во время осуществления приемосдаточных операций браками, для всех участников перевозочного процесса. После этого следует определить влияние каждого из выявленных факторов на время нахождения вагонов на путях необщего пользования с возможным выделением степени их влияния. Задача нахождения оптимального управляющего воздействия представляется сложной

(возможно неразрешимой), что связано с большим количеством факторов, способных оказывать влияние на время нахождения вагонов на путях необщего пользования. В таком случае необходима выработка набора управляющих воздействий, из которого и будет производиться выбор в каждом конкретном случае.

Список литературы

1. Муратбекова, Г. В. Технология взаимодействия станции и подъездных путей / Г. В. Муратбекова, М. М. Инкаров. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика : материалы XLI международной научно-практической конференции. – Алматы: КазАТК им. М. Тынышпаева, 2017. – С. 266 – 268.
2. Об утверждении правил эксплуатации и обслуживания железнодорожных путей необщего пользования : приказ Министерства путей сообщения РФ от 18.06.2003 № 26 / ОАО «РЖД» : сайт. – Текст : электронный. – Режим доступа: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=13> (дата обращения: 26.11.2020).
3. Москалев, А. А. Резервы систем управления / А. А. Москалев. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2008. – № 1 (14). – С. 30 – 31.
4. Шмулевич, М. И. Комплексное развитие систем управления и инфраструктуры транспорта промышленных предприятий / М. И. Шмулевич. – Текст : непосредственный // Современные технологии управления транспортным комплексом России: инновации, эффективность, результативность : сборник материалов II национальной научно-практической конференции. – Москва : Российский университет транспорта, 2019. – С. 261 – 265.
5. Барсуков, Е. А. Взаимодействие грузовой станции и пути необщего пользования / Е. А. Барсуков. – Текст : непосредственный // Труды студенческой научно-практической конференции РГУПС. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. – Ч. 1. – С. 13 – 14.
6. Шеховцов, А. И. Проблемы и перспективы управления порожними вагонопотоками в современных условиях / А. И. Шеховцов // Актуальные проблемы современной экономической науки : материалы V международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых : в 2 ч. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2017. – Ч. 1. – С. 358 – 363.
7. Шеховцов, А. И. Моделирование времени нахождения порожнего вагона на станции выгрузки / А. И. Шеховцов. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы современной экономики : материалы VI международной научно-практической конференции : в 2 ч. – Омск, 2018. – Ч. 1. – С. 277 – 281.
8. Об утверждении правил приема грузов, порожних грузовых вагонов к перевозке железнодорожным транспортом : приказ Министерства транспорта РФ от 07.12.2016 № 374 ОАО «РЖД» : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1514> (дата обращения: 26.11.2020).
9. Шеховцов, А. И. Автоматизированное рабочее место диспетчера железнодорожных перевозок порта / А. И. Шеховцов. – Текст : непосредственный // Вестник Института тяги и подвижного состава. – 2016. – № 12. – С. 87 – 90.
10. Шеховцов, А. И. Моделирование работы станций примыкания и подъездных путей предприятий, оборудованных вагоноопрокидывателями / А. И. Шеховцов. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов ДОНИЖТа. – 2017. – № 44. – С. 35 – 40.

References

1. Muratbekova G. V., Inkarov M. M. Technology of interaction between the station and access roads [Tehnologija vzaimodejstvija stancii i pod'ezdnyh putej]. *Materialy XLI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii KazATK im. M. Tynyshpaeva na temu: «Innovacionnye*

tehnologii na transporte: obrazovanie, nauka, praktika» (Materials of the XLI International scientific and practical conference of KazATK named after M. Tynyshpaev on the topic: «Innovative technologies in transport: education, science, practice»). – Almaty, 2017, pp. 266 – 268.

2. «*Ob utverzhdenii Pravil jekspluatacii i obsluzhivaniya zheleznodorozhnyh putej neobshhego pol'zovaniya*» *Prikaz Ministerstva putej soobshheniya RF ot 18.06.2003 № 26* («On approval Of the rules for operation and maintenance of non-public railway tracks», Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation No. 26 of 18.06.2003), Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=13> (accessed 26 November 2020).

3. Moskalev A. A. Management systems reserves [Rezervy sistem upravleniya]. *Transport Rossijskoj Federacii – Transport Of The Russian Federation*, 2008, no. 1 (14), pp. 30 – 31.

4. Shmulevich M. I. Integrated development of management systems and transport infrastructure of industrial enterprises [Kompleksnoe razvitie sistem upravleniya i infrastruktury transporta promyshlennyh predpriyatij] *Sbornik materialov II-j Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii Sovremennye tehnologii upravleniya transportnym kompleksom Rossii: innovacii, jeffektivnost', rezul'tativnost'* (Collection of materials of the II-th National scientific and practical conference Modern technologies of transport complex management in Russia: innovations, efficiency, effectiveness). – Moscow, 2019, pp. 261 – 265.

5. Barsukov E. A. Interaction between a freight station and a non-public track [Vzaimodejstvie gruzovoj stancii i puti neobshhego pol'zovaniya] *Trudy 78-j studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferencii RGUPS (chast' 1)* (The proceedings of the 78th scientific and practical conference RSTU (part 1)). – Rostov-on-Don, 2019, pp. 13 – 14.

6. Shekhovtsov A. I. Problems and prospects of empty car traffic management in modern conditions [Problemy i perspektivy upravleniya porozhnimi vagonopotokami v sovremennyh usloviyah]. *Aktual'nye problemy sovremennoj jekonomicheskoy nauki: materialy V mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh v 2 ch. Chast' 1* (Current problems of modern economic science: Materials of the V international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists in 2 parts. Part 1). – Omsk, 2017, pp. 363 – 367.

7. Shekhovtsov A. I. Simulation of the time spent by an empty car at the unloading station [Modelirovanie vremeni nakhozhdeniya porozhnogo vagona na stancii vygruzki] *Aktual'nye problemy sovremennoj jekonomiki: Materialy VI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: V 2 ch. Ch. 1* (Current problems of the modern economy: Materials of the VI international scientific and practical conference: In 2 parts. Part 1). – Omsk, 2018, pp. 277 – 281.

8. *Ob utverzhdenii pravil priema gruzov, porozhniy gruzovyh vagonov k perevozke zheleznodorozhnym transportom. Prikaz Ministerstva transporta RF ot 07.12.2016 № 374* (About approval of rules of acceptance of freights, empty freight cars for transportation by railway transport. Order of the Ministry of transport of the Russian Federation No. 374 dated 07.12.2016), Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1514> (accessed 26 November 2020).

9. Shekhovtsov A. I. The automated workplace of the manager of port's railway transportation [Avtomatizirovannoe rabochee mesto dispetchera zheleznodorozhnyh perevozok porta] *Vestnik Instituta tjagi i podvizhnogo sostava: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. «Povyshenie jekspluacionnoj jeffektivnosti podvizhnogo sostava i tehnologicheskij mashin», posvjashhennoj pamjati d-ra tehn. nauk, prof. V.G. Grigorenko* (Bulletin Of the Institute of traction and rolling stock: materials of all-Russia scientific-practical Conf. «Improving the operational efficiency of rolling stock and technological machines», dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor V. G. Grigorenko). – Khabarovsk, 2016, pp. 87 – 90.

10. Shekhovtsov A. I. Modeling of operation of connecting stations and approach lines of enterprises equipped by car dumpers [Modelirovanie raboty stancij primykaniya i pod'ezdnyh putej predpriyatij, oborudovannyh vagonoprokidivateljami]. *Sbornik nauchnyh trudov DonIZhT – Collection of scientific works of DRTI*, 2017, no. 44, pp. 35 – 40.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шеховцов Алексей Игоревич

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДонИЖТ).

Артема ул., д. 184, г. Донецк, 283122, Донецкая Народная Республика.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация перевозок и управление на железнодорожном транспорте», ДонИЖТ.

Тел.: +380713314951.

E-mail: oleksa.i@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Shekhovtsov Aleksey Igorevich

Donetsk Railway Transport Institute (DRTI).

184 Artem st., Donetsk, 283122, Donetsk People's Republic.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Organization of Transportation and Control in Railway Transport», DRTI.

Phone: +380713314951.

E-mail: oleksa.i@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Шеховцов, А. И. Алгоритм нахождения вагонов на путях необщего пользования как основа для повышения качества функционирования системы «железная дорога – клиенты» / А. И. Шеховцов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 119 – 128.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shekhovtsov A. I. Algorithm of cars' presence on non-public tracks as a basis for improving the quality of operation of the «railway – clients» system. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 3 (43), pp. 119 – 128 (In Russian).

УДК 697.329

И. И. Кадцын, А. П. Стариков, В. Р. Ведрученко

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ ГОРОДА ОМСКА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ЗОНДОВ

Аннотация. В статье представлены результаты исследуемых грунтов по физическим и теплофизическим характеристикам на территории города Омска. Отсутствие таких данных может приводить к ошибочным расчетам при проектировании грунтовых зондов, использующих низкопотенциальную энергию земли. Предложена методика определения минимального расстояния между скважинами, позволяющая исключить вымораживание грунта и повысить эффективность работы теплотрансформаторов.

Ключевые слова: грунтовый массив, низкопотенциальная энергия, теплоемкость, теплопроводность, теплоноситель, теплообменник, зонд, скважины, тепловой поток, теплотрансформатор.

Ivan I. Kadtcyn, Alexander P. Starikov, Victor R. Vedruchenko

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

STUDY OF THE THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE SOIL OF THE CITY OF OMSK FOR THE DESIGN OF GEOTHERMAL PROBES

Abstract. The article presents the results of the studied soils on physical and thermophysical characteristics in the territory of the city of Omsk. The lack of such data can lead to erroneous calculations in the design of ground probes using low-potential energy of the earth. A method for determining the minimum distance between wells is proposed, which allows to eliminate soil freezing and increase the efficiency of heat transformers.

Keywords: soil mass, low-potential energy, heat capacity, thermal conductivity, heat carrier, heat exchanger, probe, wells, heat flow, heat transformer.

Приоритетными направлениями развития энергетики в России являются энергосбережение и эффективное использование топливно-энергетических ресурсов. Потребность в эффективности работы теплового оборудования вызвана необходимостью снижения эксплуатационных затрат на отопление зданий и сооружений, истощением природных ресурсов, обострением экологических проблем на крупных промышленно-урбанизированных территориях.

В железнодорожной инфраструктуре существуют автономные объекты (охранные, дежурные, стрелочные посты, пункты обогрева стационарного или модульного типа, прочие обособленные здания и сооружения), которые по причине удаления от инженерных коммуникаций подключены только к электросети. Такие объекты имеют высокие эксплуатационные затраты на отопление и горячее водоснабжение.

Использование современных технологий и материалов позволяет снизить эксплуатационные расходы, повысить энергетическую эффективность объектов капитального строительства [1, 2]. Использование существующей низкопотенциальной тепловой энергии грунтового массива, воздуха, воды, хозяйственно-бытовых стоков или промышленных сбросов является одним из наиболее актуальных, но малоиспользуемых в России источников тепловой энергии. Преобразование низкопотенциального тепла позволяет без изменения (реконструкции) существующей инженерной инфраструктуры отапливать здания и сооружения, не используя дополнительные топливно-энергетические ресурсы.

В связи с отсутствием информации по теплофизическим показателям массива грунтов глубиной от 10 – 60 м в Омской области изыскательские организации выполняют монтаж грунтовых зондов с шагом 4 – 6 м, используя опыт фирм, работающих на территории европейской части Российской Федерации. Отсутствие достоверных физических, теплофизических характеристик грунтов приводит к ошибочным расчетам при проектировании грунтовых зондов, что является причиной неэффективной работы теплотрансформаторов. Кроме того, в Омском регионе отсутствуют исследовательские работы по низкопотенциальной энергии грунта, которые можно использовать при проектировании.

Тепловой поток территории Западной Сибири изменяется в широких пределах – от $0,03 - 0,09 \text{ Вт/м}^2$, в среднем составляя $0,053 - 0,054 \text{ Вт/м}^2$ [3]. В соответствии с Геотермическим атласом Сибири и Дальнего Востока [4] в Омской области преобладают тепловые потоки $0,04 - 0,050 \text{ Вт/м}^2$, локально – $0,06 - 0,07 \text{ Вт/м}^2$. В связи с малоизученностью (указанные выше исследования представлены на глубине от 0,5 км от поверхности земли), существенным перепадом термальной энергии грунтов сохраняется актуальность предпроектных инженерно-геологических изысканий. Данные исследовательских работ позволят достоверно выполнять монтаж грунтовых зондов, исключая вымораживание грунтов между скважинами.

Для определения физических и теплофизических характеристик грунтов в г. Омске, Омском районе и области выполнено бурение контрольных скважин с отбором монолитов для лабораторных исследований. Монолит – образец грунта определенного объема, основная часть которого имеет ненарушенную структуру и природную влажность грунта. Примеры отбора монолитов представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Отбор монолитов грунта

Необходимость большого количества скважин вызвана наличием схожести отобранных грунтов по физическим характеристикам. На каждый тип инженерно-геологического элемента (моноклит грунта) было отобрано по 12 образцов с разных районов города Омска и районов Омской области. Пример разреза скважины № 276-18 с описанием отбора исследуемых грунтов представлен на рисунке 2.

В соответствии с ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик определены следующие параметры [5]:

1. Влажность грунта W , %, по формуле:

$$W = 100 \frac{m_1 - m_0}{m_0 - m}, \quad (1)$$

где m_1 – масса влажного грунта с бюксом, г;

m_0 – масса высушенного грунта с бюксом, г;

m – масса пустого бюкса, г.

2. Влажность грунта на границе текучести (W_L , %) определена методом балансирующего конуса как влажность, приготовленная из исследуемого грунта пасты, при которой балансирующий конус погружается под действием собственной массы за 5 с на глубину 10 мм:

$$W_L = 100 \frac{m_1 - m_0}{m_0 - m}. \quad (2)$$

3. Влажность грунта на границе раскатывания (пластичности) (W_p , %) определена как влажность приготовленной из исследуемого грунта пасты, при которой паста раскатывается в жгут диаметром 3 мм, начинает распадаться на кусочки длиной 3 – 10 мм:

$$W_p = 100 \frac{m_1 - m_0}{m_0 - m}. \quad (3)$$

4. Плотность грунта ρ , г/см³, находим по формуле:

$$\rho = \frac{m_1 - m_0 - m_2}{V}, \quad (4)$$

где m_1 – масса грунта с кольцом и пластинками, г;

m_0 – масса кольца, г;

m_2 – масса пластинок, г;

V – внутренний объем кольца, см³.

5. Плотность скелета (сухого) грунта ρ_d , г/см³, вычисляем по формуле:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0,01w}. \quad (5)$$

6. Объем пикнометра V_n , см³, получим по формуле:

$$V_n = \frac{m'_2 - m_n}{\rho_w}, \quad (6)$$

где m'_2 – масса пикнометра с дистиллированной водой (или нейтральной жидкостью) при температуре тарировки, г;

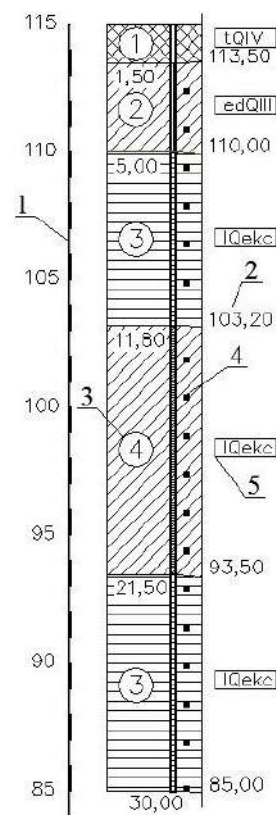


Рисунок 2 – Разрез исследуемой скважины № 276-18:

- 1 – горизонтальный масштаб разреза, м;
- 2 – абсолютная отметка пересечения инженерно-геологического элемента (ИГЭ);
- 3 – номер ИГЭ;
- 4 – точка отбора монолита ИГЭ;
- 5 – индекс ИГЭ

$m_{\text{п}}$ – масса пустого пикнометра, г;

ρ_w – плотность воды (или нейтральной жидкости) при той же температуре, г/см³.

7. Массу пикнометра с дистиллированной водой или нейтральной жидкостью m_2 , г, при температуре испытаний находим по формуле:

$$m_2 = m_{\text{п}} + \rho_w V_{\text{п}}, \quad (7)$$

где ρ_w – плотность воды (или нейтральной жидкости) при той же температуре испытаний.

8. Плотность частиц грунта ρ_s , г/см³, определяем по выражению:

$$\rho_s = \rho_w m_0 / (m_0 + m_2 - m_1), \quad (8)$$

где m_0 – масса сухого грунта, г;

m_1 – масса пикнометра с водой и грунтом после кипячения при температуре испытания, г;

m_2 – масса пикнометра с водой при той же температуре, г;

ρ_w – плотность воды при той же температуре, г/см³.

Примечание: массу сухого грунта m_0 определили как разность результатов двух взвешиваний, выполненных по п. 13.3.1. ГОСТ 5180-2015.

9. Определение грунта в воздушно-сухом состоянии m_0 вычислили по формуле:

$$m_0 = m / (1 + 1,01w_g), \quad (9)$$

где m – масса пробы воздушно-сухого грунта, г;

w_g – гигроскопическая влажность грунта, %.

Теплоемкость грунта характеризует его способность аккумулировать тепло. Различают удельную и объемную теплоемкость [11].

Объемная теплоемкость (C , ккал/м³·град) численно равна количеству тепла, необходимого для изменения температуры единицы объема грунта на 1°.

Объемная теплоемкость грунта определяется так:

$$C = \gamma_{\text{об}} c, \quad (10)$$

где $\gamma_{\text{об}}$ – объемный вес грунта, кг/м³;

c – удельная теплоемкость, ккал/кг·град.

Для определения коэффициента теплопроводности грунта (отобранных монолитов) использован метод теплового импульса в условиях грунтовой лаборатории. Способ исследования был основан на нагреве образцов плоским электрическим нагревателем в течение заданного промежутка времени.

В опыте измеряли скорость изменения температуры образцов на поверхности контакта с плоским нагревателем и на фиксированном расстоянии от него. Метод применяют для комплексного определения теплофизических характеристик грунтов при положительных температурах от 0 – 40°С на двух одинаковых образцах. Устройство прибора представлено на рисунке 3.

При испытании коэффициент теплопроводности исследованного образца грунта был определен по формуле:

$$\lambda_{\text{т}} = \frac{Q_3 \sqrt{a} (\sqrt{t} - \sqrt{t - t_0})}{\sqrt{\pi} F (T - T_0)}, \quad (11)$$

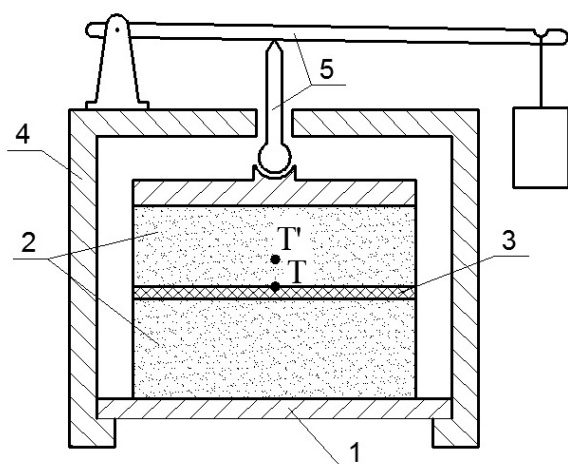


Рисунок 3 – Схема прибора для определения коэффициента теплопроводности грунтов по методу теплового импульса:

1 – подставка; 2 – образец монолита грунта; 3 – плоский электрический нагреватель; 4 – теплоизоляционный кожух; 5 – прижимное устройство; T , T' – термодатчики

где $Q_3 = 0,86U^2/R_3$ – тепловая мощность нагревателя (определяется по заводским характеристикам прибора), ккал/ч;

F – площадь нагревателя в контакте с одним образцом, м²;

$a = \frac{l^2}{4t \cdot y}$ – коэффициент температуропроводности грунта, м²/ч;

l – расстояние от нагревателя до термопары T_3 , м;

T – температура образца в момент времени t (ч), измеренная по термометру T_3 , °С;

t_0 – продолжительность действия нагревателя, ч;

t' – продолжительность времени к моменту измерения температуры по термометру T_3 , ч;

y – значение, определяемое по функции $B(y)$ (см. таблицу 19 в документе [10]).

Величина функции $B(y)$ определяется по формуле:

$$B(y) = \frac{(T'' - T_0)(\sqrt{t} - \sqrt{t - t_0})}{(T - T_0)\sqrt{t}}, \quad (12)$$

где T_0 – начальная температура образца, °С;

T'' – температура образца в момент времени t , измеренная по термопаре T_3 , °С.

Контрольное определение коэффициента теплопроводности образца грунта осуществляется по формуле:

$$\lambda'_T = \frac{Q_3 \sqrt{a} [\sqrt{t_{\max}} B(y_1) - \sqrt{t_{\max} - t_0} B(y_2)]}{\sqrt{\pi} F (T_{\max} - T_0)}, \quad (13)$$

где $T_{\max}$ – значение максимума температуры в месте расположения термопары T_3 , °С

$t_{\max}$ – время наступления максимума температуры по термопаре T_3 , отсчитанное от начала включения нагревателя, ч;

$B(y_1), B(y_2)$ – значения функции $B(y)$, определены по формулам:

$$y_1 = \frac{t_{\max} - t_0}{t_0} \ln \sqrt{\frac{t_{\max}}{t_{\max} - t_0}}, \quad (14)$$

$$y_2 = \frac{t_{\max}}{t_0} \ln \sqrt{\frac{t_{\max}}{t_{\max} - t_0}}. \quad (15)$$

Величину коэффициента теплопроводности исследованных образцов грунта приняли по среднему арифметическому значению основного и контрольного определений, вычисленных с точностью до 0,01 ккал/м·ч·град. В случае выявления разницы значений коэффициента теплопроводности в основном и контрольном определениях, превышающих 5 %, опыт выполнялся повторно.

Дополнительно теплофизические параметры отобранных монолитов определялись при помощи прибора KD2 Pro (свидетельство о поверке № H2413/2057-2020), принцип работы которого основан на измерении скорости изменения температуры цилиндрического зонда, погруженного в испытываемый материал. Общий вид прибора при выполнении лабораторных исследований монолита грунта представлен на рисунке 4.

Средние результаты лабораторных исследований по физическим и теплофизическим характеристикам исследованных образцов грунтового массива представлены в таблице 1.



Рисунок 4 – Общий вид прибора KD2 Pro

Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

Таблица 1 – Ведомость средних результатов лабораторных исследований по физическим и теплофизическим характеристикам исследованных образцов грунтового массива

№ п/п	Разновидность грунта по ГОСТ 25100-2011	Есте- ственная влажность грунта, д. ед.	Пористость грунта, %	Коэффициент пористости	Коэффициент водонасыще- ния	Плотность частиц грунта, г/см ³	Коэффи- циент теплопро- водности, Вт/(м·К)	Объемная теплоемкость, МДж/(м ³ ·К)
1	Супесь твердая	0,15	30,5	0,43	0,92	2,69	1,815	3,291
2	Супесь пластичная	0,20	34,8	0,52	1	2,69	1,993	3,522
3	Супесь текучая	0,18	35,9	0,55	0,87	2,69	1,936	3,461
4	Глина твердая	0,12	34,7	0,53	0,62	2,75	1,330	3,667
5	Глина полутвердая	0,22	40,4	0,66	0,90	2,75	1,392	3,604
6	Глина тугопластичная	0,25	43,3	0,74	0,93	2,75	1,412	3,662
7	Глина мягкопластичная	0,34	47,2	0,88	1	2,75	1,714	3,928
8	Глина текучепластичная	0,29	43,1	0,76	1	2,75	1,548	3,773
9	Суглинок твердый	0,13	33,3	0,49	0,71	2,72	1,314	3,856
10	Суглинок полутвердый	0,13	34,3	0,52	0,68	2,72	1,352	3,525
11	Суглинок тугопластичный	0,20	38,7	0,63	0,86	2,72	1,262	2,945
12	Суглинок мягкопластичный	0,23	43,5	0,77	0,81	2,72	1,423	3,472
13	Суглинок текучепластичный	0,25	41,2	0,70	0,97	2,72	1,323	3,190
14	Песок пылеватый плотный влажный	0,14	33,3	0,49	0,75	2,67	1,734	3,140
15	Песок мелкий	0,16	34,9	0,54	0,79	0,67	1,806	3,292

Методика определения расстояния между геотермальными скважинами. Разбивка скважин должна выполняться без пересечения температурных полей, образуемых при эксплуатации геотермальных зондов, для исключения вымораживания грунтового массива (пример температурного поля вымораживания грунта между вертикальными зондами в наиболее холодный период представлен на рисунке 5).

Достоверное определение минимального расстояния скважин позволяет определить необходимую площадь территории под проектируемые грунтовые теплообменники, что обеспечивает надежную работу теплотрансформаторов, исключая вымораживание грунта между скважинами в наиболее холодный период эксплуатации зданий (сооружений).

Объем грунтового массива, необходимый для обеспечения требуемой нагрузки на систему теплоснабжения здания, определяется на основании наличия следующих данных:

- физико-механические и теплофизические характеристики грунтов;
- свойства материала труб теплообменника [8];
- характеристика теплоносителя [8];
- количество энергии, которое грунтовый теплообменник отбирает из грунтового массива.

Для выполнения расчета расстояния между скважинами рассматриваем грунтовый массив, окружающий скважину, как цилиндр (рисунок 6), тогда радиус цилиндра будет являться определяемым значением.

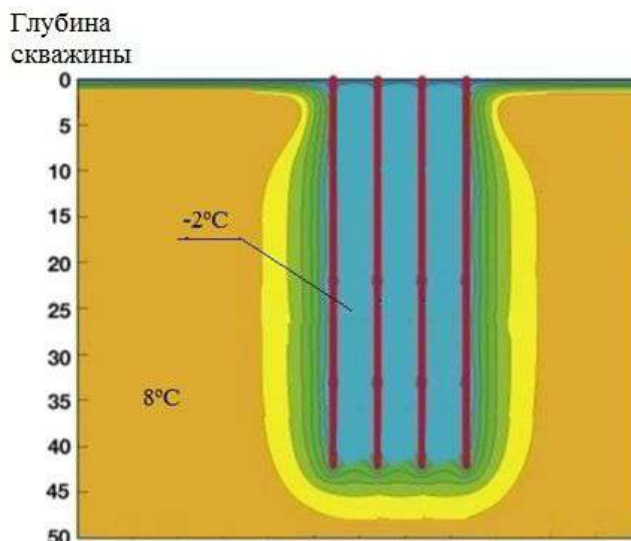


Рисунок 5 – Пример температурного поля вымораживания грунта между вертикальными зондами в наиболее холодный период

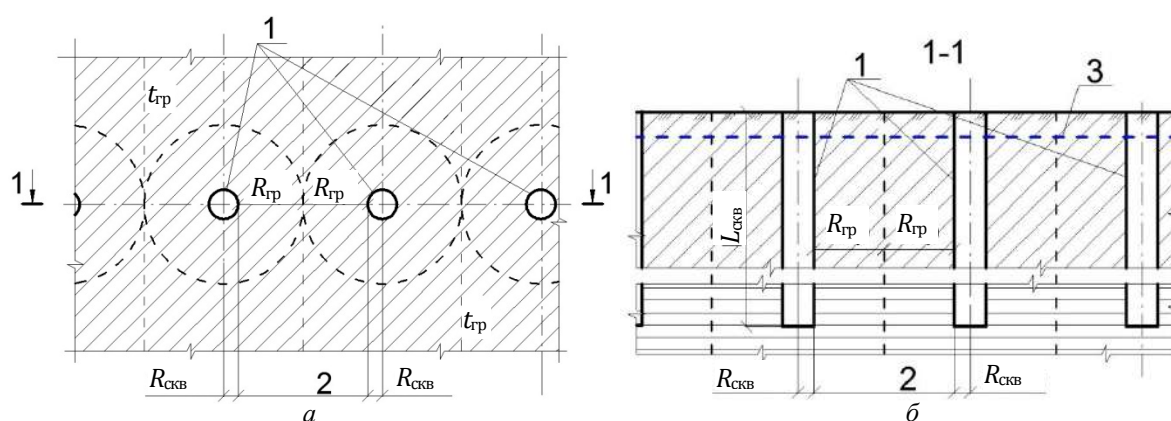


Рисунок 6 – План-схема поперечного разреза для расчета расстояния между скважинами системы сбора низкопотенциальной энергии грунта:

1 – геотермальные скважины; 2 – грунтовый массив; 3 – «нейтральная зона» грунта; $R_{скв}$ – радиус скважины; $R_{гр}$ – радиус грунтового массива, окружающего скважину; $L_{скв}$ – длина геотермальной скважины; $t_{гр}$ – температура грунта

Определяем количество теплоты, извлекаемое одной скважиной за отопительный период, Дж:

$$Q_{\text{треб}} = 86400 q_{\text{скв}} L_{\text{скв}} \cdot z_{\text{от. п}}, \quad (16)$$

где $q_{\text{скв}}$ – средний тепловой поток с одного метра скважины, Вт/м;

$L_{\text{скв}}$ – глубина скважины, м;

$z_{\text{от. п}}$ – продолжительность отопительного периода, принимаемая по [6] в соответствии с [7], сут/год.

Определяем объем грунта, способный покрыть требуемую нагрузку при эксплуатации одной скважины, $V_{\text{гр}}$, м³:

$$V_{\text{гр}} = \frac{Q_{\text{треб}}}{c_{\text{гр}} \rho_{\text{гр}} \left[t_{\text{гр}} - \left(\frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2} \right) \right]}, \quad (17)$$

где $c_{\text{гр}}$ – удельная теплоемкость грунтового массива, Дж/кг·К;

$\rho_{\text{гр}}$ – плотность грунтового массива, кг/м³;

$t_{\text{гр}}$ – температура грунтового массива, °С;

$t_{\text{вх}}$ и $t_{\text{вых}}$ – температура входа и выхода рабочей жидкости в грунтовом теплообменнике, °С.

Расстояние от центра скважины с грунтовым теплообменником до границы эксплуатируемого массива грунта ($r_{\text{гр}}$, м) определяем по формуле:

$$r_{\text{гр}} = \sqrt{\frac{V_{\text{гр}}}{\pi L_{\text{скв}}}}. \quad (18)$$

Внутренняя температура теплообменника (зонда) является переменной вследствие нагревания хладагента по глубине скважины. Таким образом, необходимо учитывать $R_{\text{нар}}$ (наружный радиус зонда), увеличив расстояние между скважинами. В соответствии с предварительной методикой расчета формулу (18) можно преобразовать, используя выражения (16) и (17). Получим общую формулу для определения расстояния между геотермальными скважинами ($R_{\text{РГС}}$):

$$R_{\text{РГС}} = 2 \sqrt{\frac{86400 q_{\text{скв}} z_{\text{от. п}}}{\pi c_{\text{гр}} \rho_{\text{гр}} \left[t_{\text{гр}} - \left(\frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2} \right) \right]}} + 2R_{\text{скв}}, \quad (19)$$

где $R_{\text{скв}}$ – радиус скважины, м;

Таким образом, получена формула для определения расстояния между скважинами, которая учитывает теплофизические параметры грунта, величину теплового потока, температурный перепад между массивом грунта и теплоносителем в зависимости от продолжительности отопительного периода для конкретного региона.

Полученные значения расстояния между скважинами характерны для эксплуатации при постоянном значении количества теплоты, извлекаемой в течение отопительного периода, т. е. исключается возможная неравномерность в работе скважины, что гарантирует сохранение температуры в грунтовом массиве.

Таким образом, по результатам выполнения лабораторных исследований грунтов, выбранных по разведочным скважинам Омского района Омской области, разработана методика расчета определения минимального расстояния между скважинами с грунтовыми зондами. Выполненные расчеты при учете различных комбинаций теплофизических свойств грунтов позволили составить таблицу с рекомендуемыми расстояниями между скважинами. Результаты расчетов определения расстояния между грунтовыми теплообменниками приведены в таблице 2.

Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

Таблица 2 – Определение расстояния между грунтовыми зондами на основании среднего теплового потока с одного метра скважины (Вт/м) и объемной теплоемкости грунтового массива (МДж/(м³·К))

Виды грунтов	$c_p \cdot 10^3$, кДж/м³·К	$q_{\text{скв}}$, Вт/м						
		40	50	60	70	80	90	100
Среднетеплоемкие	3,1 – 3,4	6 м	7 м	7 м	8 м	8 м	9 м	10 м
	3,5 – 3,8	6 м	7 м	7 м	8 м	8 м	9 м	9 м
	3,9 – 4,2	6 м	6 м	7 м	7 м	8 м	8 м	9 м

Результаты выполненных исследований подтвердили наличие высокой погрешности в выполняемых проектных, монтажных работах, при устройстве грунтовых зондов на территории Омского района Омской области. Апробированные грунты являются следнетеплоемкими, и усредненное рекомендуемое расстояние между скважинами при отсутствии инженерно-геологических изысканий необходимо принимать не менее 8 м.

Выполненные исследования, позволили актуализировать ранее разработанную номограмму [9] для определения расстояния между скважинами с грунтовыми зондами. Пример определения расстояния между скважинами при наличии выполненных изыскательских работ представлен на рисунке 7.

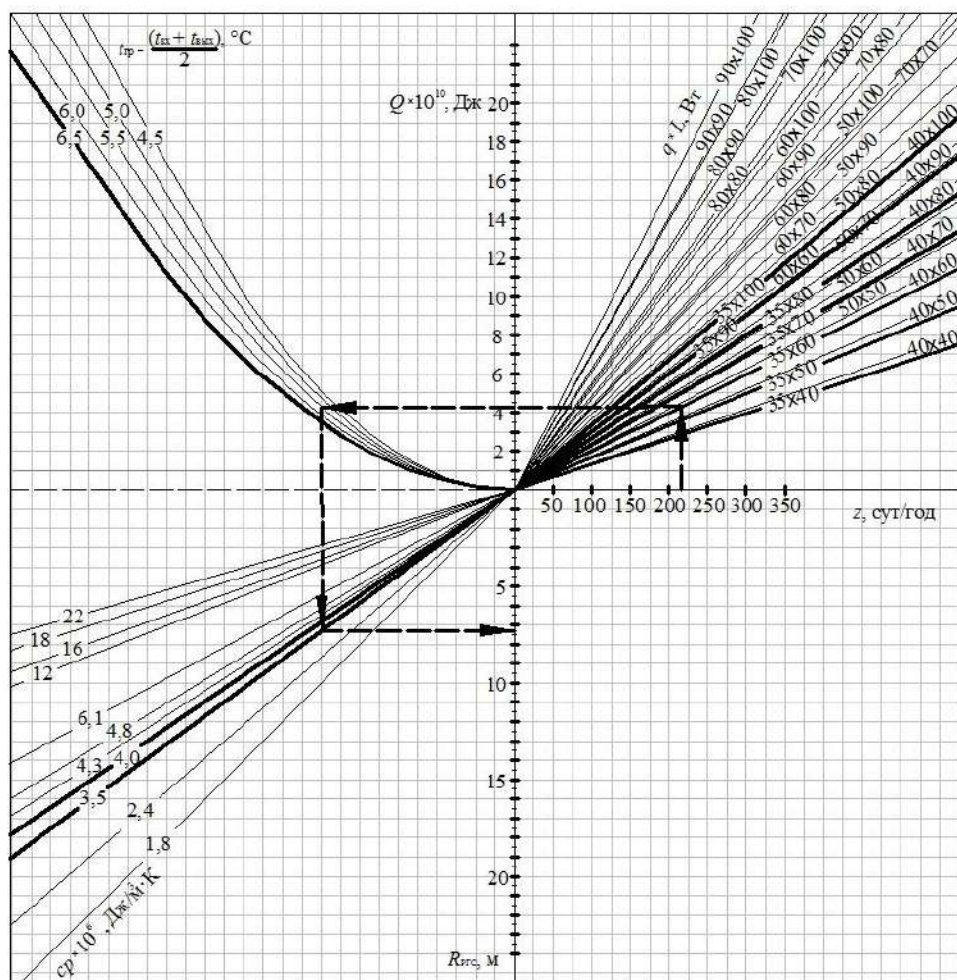


Рисунок 7 – Номограмма определения расстояния между скважинами:

z – продолжительность отопительного периода, сут/год; q – тепловой поток с метра скважины, Вт/м; L – глубина скважины, м; Q – количество теплоты, извлекаемой одной скважиной за отопительный период, Дж; $t_{\text{гр}}$ – температура грунта, °C (принята 8 °C); $t_{\text{вх}}$ – температура теплоносителя на входе в грунтовый теплообменник, °C (принята 5 °C); $t_{\text{вых}}$ – температура теплоносителя на выходе из грунтового теплообменника, °C (принята исходя из допустимого оптимального температурного перепада 0 °C для стабильной работы теплового насоса); $c_p \cdot 10^6$ – объемная теплоемкость грунтового массива, Дж/м³·К; R – расстояние между скважинами с грунтовыми теплообменниками, м

Расчеты, проведенные по представленной номограмме, показали, что одна скважина глубиной 60 м на территории г. Омска позволяет извлекать не менее 10 Гкал низкопотенциальной тепловой энергии за отопительный период.

На основании выполненных на территории г. Омска, Омского района и Омской области исследований можно сделать выводы:

- изученные монолиты земли относятся к среднетеплоемким грунтам [9];
- используемое на территории европейской части Российской Федерации расстояние между грунтовыми зондами не обеспечивает поступление нужного количества низкопотенциального тепла, что подтверждается практическими замерами;
- разработанная методика определения расстояния между геотермальными скважинами позволила достоверно определить рекомендуемое расстояние между теплообменниками в исследуемом районе;
- выполненные изыскания позволили актуализировать ранее разработанную номограмму для определения расстояния между скважинами с грунтовыми зондами, достоверность которых обеспечивается проведенными экспериментальными исследованиями грунтов.

Список литературы

1. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 27.12.2018) «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» / КонсультантПлюс : сайт. – Текст : электронный. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978 (дата обращения: 08.12.2020).
2. Распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. №1715-р «Энергетическая стратегия России на период до 2030 г.» / КонсультантПлюс : сайт. – Текст : электронный. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94054 (дата обращения: 08.12.2020).
3. Геология и полезные ископаемые России. Т. 2. Западная Сибирь / гл. ред. В. П. Орлов, ред. 2-го тома А. Э. Конторович, В. С. Сурков. – Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2000. – 477 с. – Текст : непосредственный.
4. Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока / Дучков А. Д., Железняк М. Н., Аюнов Д. Е., Веселов О. В., Соколова Л. С., Казанцев С. А., Горнов П. Ю., Добрецов Н. Н., Болдырев И. И., Пчельников Д. В., Добрецов А. Н. – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620488 от 17.03.2015.
5. ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик / ОАО «ПНИИИС». – Москва : Стандартинформ, 2016. – 19 с. – Текст : непосредственный.
6. СП 131.13330.2018 «СНиП 23-01-99 Строительная климатология» / НИИСФ РААСН, ФГБУ «ГТО» / АР-Групп. Проектная организация: сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://ar-grupp.pf/wp-content/uploads/2019/05/SP-131.13330.2018-SNiP-23-01-99-Stroitel'naya-klimatologiya-.pdf> (дата обращения: 08.12.2020).
7. СП 50.13330.2012 «СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий» / Строительные нормы и правила РФ : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://sniprf.ru/sp50-13330-2012> (дата обращения: 08.12.2020).
8. Проектная документация. Справочник по проектированию и монтажу тепловых насосов / buderus.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.buderus.ru/files/200903232039060.17%20%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D1%85%20%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%BE%D1%81%D0%BE%D0%B2.pdf> (дата обращения: 08.12.2020).
9. Журмилова, И. А. Влияние теплофизических свойств грунта на формирование геотермального поля в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта / И. А. Журмилова, А. С. Штым. – Текст : непосредственный // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2017. – № 3 (32) – С. 3 – 6.

10. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов / ПНИИС Госстроя СССР, НИИОСП Госстроя СССР, ЛенЗНИИЭП Госгражданстроя СССР, МИСИ им. В. В. Куйбышева, Фундаментпроект Минмонтажспецстроя СССР; под. ред. Р. М. Саркисяна, З. А. Нерсесова [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1973. –191 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Federal'nyi zakon ot 23.11.2009 № 261-FZ (red. ot 27.12.2018) «Ob energosberezhenii i povyshenii energeticheskoi effektivnosti i o vnesenii izmenenii v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiiskoi Federatsii» (Federal Law No. 261-FZ of 23.11.2009 (ed. Dated 27.12.2018) «On energy saving and energy efficiency improvement and on amendments to certain Legislative Acts of the Russian Federation»), Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978 (accessed 08 December 2020).

2. *Rasporiazhenie Pravitel'stva RF ot 13 noiabria 2009 g. №1715-r «Energeticheskaia strategiiia Rossii na period do 2030 g.»* (Order of the Government of the Russian Federation No. 1715-r of November 13, 2009. «Energy strategy of Russia for the period up to 2030»), Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94054 (accessed 08 December 2020).

3. *Geologiiia i poleznye iskopaemye Rossii. T. 2. Zapadnaia Sibir' / gl. red. V. P. Orlov, red. 2-go toma A. E. Kontorovich, V. S. Surkov* (Geology and Mineral Resources of Russia, vol. 2. Western Siberia, ch. ed. V. P. Orlov, ed. the 2nd volume of A. E. Kontorovich, V. S. Surkov). Saint-Petersburg: VSEGEI Publ., 2000, 477 p.

4. Duchkov A. D., Zheleznyak M. N., Ayunov D. E., Veselov O. V., Sokolova L. S., Kazantsev S. A., Gornov P. Yu., Dobretsov N. N., Boldyrev I. I., Pchelnikov D. V., Dobretsov A. N. Geothermal Atlas of Siberia and the Far East [Geotermicheskii atlas Sibiri i Dal'nego Vostoka], Certificate of state registration of the database No. 2015620488 of 17.03.2015, Available at: <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/science/results/res-geotermicheskii-atlas-sibiri-i-dalnego-vostoka-2009-2012> (accessed 08 December 2020).

5. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniia fizicheskikh kharakteristik, GOST 5180-2015, OAO «PNIIS»* (Soils. Methods of laboratory determination of physical characteristics, GOST 5180-2015, JSC «PNIIS»). Moscow: Standartinform, 2016, 19 p.

6. *SP 131.13330.2018 «SNIp 23-01-99 Stroitel'naia klimatologiiia»* (SP 131.13330.2018 «SNIp 23-01-99 Construction Climatology»), Available at: <https://ap-rpynn.pdf/wp-content/uploads/2019/05/SP-131.13330.2018-SNIp-23-01-99-Stroitel'naya-klimatologiya.pdf> (accessed 08 December 2020).

7. *SP 50.13330.2012 «SNIp 23-02-2003 Teplovaia zashchita zdanii»* (SP 50.13330.2012 SNIp 23-02-2003. Thermal protection of buildings), Available at: <http://sniprf.ru/sp50-13330-2012> (accessed 08 December 2020).

8. *Proektnaia dokumentatsiia. Spravochnik po proektirovaniu i montazhu teplovykh nasosov* (Project documentation. Guide to the design and installation of heat pumps), Available at: <https://www.buderus.ru/files/200903232039060.17%20%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D1%85%20%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%BE%D1%81%D0%BE%D0%B2.pdf> (accessed 08 December 2020).

9. Zhurmilova I. A., Shtym A. S. Influence of thermophysical properties of the soil on the formation of a geothermal field in the system of collecting low-potential energy of the soil [Vlianie teplofizicheskikh svoistv grunta na formirovanie geotermal'nogo polia v sisteme sbora nizkopotentzial'noi energii grunta]. *Vestnik inzhenernoi shkoly DVFU – Bulletin of the FEFU Engineering School*, 2017, no. 3 (32), pp. 3 – 8.

10. *Rukovodstvo po opredeleniiu fizicheskikh, teplofizicheskikh i mekhanicheskikh kharakteristik merzlykh gruntov* (Guidelines for determining the physical, thermophysical and mechanical characteristics of frozen soils), under the general editorship of R. M. Sarkisyan, Z. A. Nersesova, S. S. Vyalov, A. G. Zatsarnaya. Moscow: Stroyizdat Publ., 1973, 191 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кадцын Иван Ильич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: 8-913-963-20-13.

E-mail: kii55@bk.ru

Стариков Александр Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: StarikovAP@omgups.ru

Ведрученко Виктор Родионович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кадцын, И. И. Исследование теплофизических характеристик грунтов города Омска для проектирования геотермальных зондов / И. И. Кадцын, А. П. Стариков, В. Р. Ведрученко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 128 – 139.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kadtcyn Ivan Ilyich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx St., Omsk, 644046, the Russian Federation. Post-graduate student of the department «Heat power

engineering», OSTU.

Phone: 8-913-963-20-13.

E-mail: kii55@bk.ru

Starikov Alexander Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx St., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor, head of the department «Heat power engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: StarikovAP@omgups.ru

Vedruchenko Victor Rodionovich

Omsk state University of railway transport (OSTU).

Marx St., 35, Omsk, 644046, Russian Federation.

Doctor of Science in Engineering, Professor of the department «Heat power engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kadtsyn I. I., Starikov A. P., Vedruchenko V. R. Research of thermophysical characteristics of soils of the city of Omsk for designing geothermal probes. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 3 (43), pp. 128 – 139 (In Russian).

УДК 519.876.5:629.4.083

Т. Б. Брылова¹, А. В. Кутышкин²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;

²Югорский государственный университет (ЮГУ), г. Ханты-Мансийск, Российская Федерация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РЕИНЖИНИРИНГЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕМОНТА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. В работе рассматривается применение имитационного моделирования при реинжиниринге технологических процессов ремонта узлов подвижного состава на примере ремонта тележки модели 18-578 полувагона. В качестве объекта реинжиниринга рассматривался наиболее трудоемкий подпроцесс ремонта надрессорной балки этой тележки. Рассматривались три варианта реинжиниринга данного подпроцесса, предполагающие полную замену используемого в настоящее время на ремонтных операциях (позициях) технологического оборудования на более производительное, организацию дублирующей ремонтной позиции для «узкого места» данного подпроцесса с использованием имеющегося технологического оборудования и реорганизацию технологи-

ческого маршрута перемещения надрессорной балки между ремонтными позициями подпроцесса. Для обоснования выбора наиболее предпочтительного варианта реинжиниринга использовались значения таких показателей функционирования рассматриваемого подпроцесса, как его производительность за смену (пропускная способность), коэффициент загрузки используемых на ремонтных позициях ресурсов, объем незавершенного производства на конец смены, численность занятых в производстве рабочих и затраты, связанные с возможным приобретением нового технологического оборудования. Имитационное моделирование функционирования рассматриваемого подпроцесса ремонта надрессорной балки тележки осуществлялось на основе методов теории массового обслуживания. Построение имитационных моделей и оценка на их основе перечисленных выше показателей производились в среде Arena RockWell Software. При разработке имитационных моделей каждого из возможных вариантов реинжиниринга подпроцесса учитывалась дисциплина его организации и сопровождения. В статье для каждого из вариантов реинжиниринга представлены расчетные количественные оценки перечисленных показателей, полученные с использованием соответствующих разработанных имитационных моделей. Использование данных оценок снижает риски при разработке и последующей реализации организационно-технических решений, связанных с модернизацией рассматриваемого технологического подпроцесса ремонта надрессорной балки тележки полувагона.

Ключевые слова: ремонт тележки полувагона, реинжиниринг, технологический процесс, имитационное моделирование, Arena.

Tatiana B. Brylova¹, Andrey V. Kutyshkin²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation;

²Yugra State University (YSU), Khanty-Mansiysk, the Russian Federation

THE USE OF SIMULATION IN THE REENGINEERING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF ROLLING STOCK UNITS

Abstract. The paper considers the use of simulation modeling in the reengineering of technological processes for repairing rolling stock units on the example of repairing a bogie model 18-578 of an open-top car. The most time-consuming sub-process of repairing the bolster of this bogie was considered as the object of reengineering. Three options for reengineering of this subprocess were considered, implying a complete replacement of the technological equipment currently in use at repair operations (positions) with more efficient positions of the subprocess. To substantiate the choice of the most preferable reengineering option, the values of such indicators of the functioning of the subprocess under consideration as its productivity per shift (throughput), the load factor of the resources used at the repair positions, the volume of work in progress at the end of the shift, the number of workers employed in production and the costs associated with the possible purchase of new technological equipment. Simulation modeling of the functioning of the considered sub-process of bogie bolster repair was carried out on the basis of the methods of the queuing theory. The construction of simulation models and their assessment of the above indicators were carried out in the Arena RockWell Software environment. When developing simulation models for each of the possible options for reengineering a subprocess, the discipline of its organization and maintenance was taken into account. In the article, for each of the reengineering options, the calculated quantitative estimates of the listed indicators are presented, obtained using the corresponding developed simulation models. The use of these assessments reduces the risks in the development and subsequent implementation of organizational and technical solutions associated with the modernization of the considered technological sub-process of repair of the bolster of a gondola car bogie.

Keywords: gondola car bogie repair, reengineering, technological process, simulation, Arena.

Реинжиниринг бизнес-процессов (технологических процессов – ТП) дискретного производства, к которым относятся и ТП ремонта узлов подвижного железнодорожного состава, представляет собой совокупность действий по перепроектированию и изменению как его структуры, так и его функциональных (технологических) показателей с целью повышения результативности и эффективности объекта реинжиниринга. Изменение структуры ТП базируется на предварительном анализе его существующей структуры и ориентировано на выявление диспропорций в производственных потоках, оценку целесообразности организации межоперационных складов и т. п. Изменение показателей ТП (технологических), как правило, связано с обоснованием использования более производительного технологического оборудования, выявлением «узких мест» технологического процесса и разработкой мер по их устранению, проверкой возможности структурных изменений ТП с учетом специфики и технологических ограничений его функционирования. Любой бизнес-процесс/ТП представляет собой сложную организационно-техническую систему, что обуславливает необходимость

проведения предварительной оценки как возможности, так и целесообразности реализации выработанных в рамках его реинжиниринга организационно-технических решений, что возможно на основе использования имитационного моделирования, в частности, использования программного продукта ArenaTM RockWell Software [1 – 5]. Методология имитационного моделирования бизнес-процессов в контексте их реинжиниринга предполагает разработку двух типов моделей. Модель «AS IS» (Как есть) описывает функционирование исходного рассматриваемого процесса. Модели «AS TO BE» (Как будет) в свою очередь описывают функционирование вариантов технологического процесса, сформированных в результате проведения его реинжиниринга [6 – 8]. Принятие же управленческих решений о целесообразности проведения реинжиниринга технологического процесса вообще и выбор наиболее рационального варианта изменения его структуры и технологических показателей осуществляются на основе сравнения количественных оценок ключевых показателей ТП, полученных в результате имитационного моделирования его функционирования. Этот подход существенно снижает риски принятия подобного рода решений и их реализации, а также связанных с ними издержек [6]. Таким образом, исследования в области использования методов имитационного моделирования при реинжиниринге бизнес-процессов дискретного производства актуальны с практической и с научной точки зрения. В данной работе в качестве объекта реинжиниринга выступает технологический процесс ремонта адресной балки тележки модели 18-578 полувагона. Рассматривается ряд достаточно широко используемых вариантов реинжиниринга линейных технологических процессов ремонта узлов транспортных средств.

Деповский ремонт тележки модели 18-578 полувагона осуществляется в специализированном тележечном отделении вагоноборочного цеха депо, которое включает в себя участки, обеспечивающие полный технологический процесс её ремонта, начиная с входного контроля тележки и завершая выходным контролем качества произведенного ремонта. Технологический процесс ремонта тележки данной модели включает в себя технологические операции, распределенные по ремонтным позициям тележечного отделения [9]. Предварительный анализ структуры ТП и технологического времени его операций ($T_{ТО}$) позволил сделать заключение, что его наиболее «узким местом» является совокупность ТО (подпроцесс) ремонта адресной балки тележки (таблица 1). Ремонтные (технологические) операции данного подпроцесса организованы в две укрупненные ремонтные позиции исходя из физико-механических процессов обработки металлов: позицию наплавки/сварки и позицию механической обработки. Ремонт тележек грузовых вагонов осуществляют две бригады работников, работающих посменно по два дня через два дня отдыха. Продолжительность смены составляет 11 часов с двумя перерывами длительностью в 1 час и 0,5 часа.

Технологическое время $T_{ТО}$ реализации каждой ремонтной операции является величиной случайной, что представлено в таблице 1 в виде соответствующего теоретического закона распределения случайных величин, который максимально близко описывает распределение исходных данных, накопленных в ходе наблюдений за функционированием этих операций. Минимальное расчетное значение критерия χ^2 при оценке степени соответствия собранных данных и теоретического закона распределения составило 0,72. Это говорит о возможности использования приведенных в таблице 1 законов распределения для описания изменений значений величины $T_{ТО}$ при моделировании функционирования соответствующих ТО с доверительной вероятностью 0,95 [10].

Реинжиниринг рассматриваемого технологического подпроцесса ориентирован на повышение его пропускной способности, т. е. на увеличение количества отремонтированных адресных балок за смену. Наряду с этим критерием актуальными, по мнению авторов, являются также показатели незавершенного производства, количество занятых рабочих и уровень загрузки/простоя технологического оборудования, задействованного непосредственно на ремонтных операциях.

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Таблица 1 – Характеристики и обозначения технологических операций ремонта наддрессорной балки тележки модели 18-578 полувагона

№ п/п	Название технологической операции	Обозначение ТО в модели Arena	Количество рабочих, занятых на ТО	Обозначение рабочего в модели Arena	Значение T_{TO} (в обозначениях Arena)	
					старое оборудование	новое оборудование
1	Транспортировка наддрессорной балки на позицию накопления	Transport_1	1,00	Operator_2	UNIFORM* (9,7; 10,2)	UNIFORM* (9,7; 10,2)
2	Транспортировка наддрессорной балки на позицию наплавки	Transport_2	1,00	Operator_3	UNIFORM (1,8; 2,3)	UNIFORM (1,8; 2,3)
3	Наплавка наклонных поверхностей наддрессорной балки	Surfacing_1	1,00	Welder_1	NORMAL** (29, 3)	NORMAL (22, 2)
4	Транспортировка наддрессорной балки на позицию наплавки	Transport_3	1,00	Operator_3	UNIFORM (1,8; 2,3)	UNIFORM (0,8; 1,3)
5	Наплавка подпятника наддрессорной балки	Surfacing_2	1,00	Welder_2	NORMAL (33,3)	NORMAL (29, 3)
6	Транспортировка наддрессорной балки на позицию механообработки наклонных поверхностей наддрессорной балки	Transport_4	1,00	Operator_3	UNIFORM (1,8; 2,3)	UNIFORM (0,8; 1,3)
7	Механическая обработка наклонных поверхностей наддрессорной балки	Machining_1	1,00	Craftsman_1	NORMAL (22,2)	NORMAL (19,2)
8	Транспортировка наддрессорной балки на позицию механообработки подпятника наддрессорной балки	Transport_5	1,00	Operator_3	UNIFORM (1,8; 2,3)	UNIFORM (0,8; 1,3)
9	Механическая обработка подпятника наддрессорной балки	Machining_2	1,00	Craftsman_2	NORMAL (43,3)	NORMAL (38,3)
10	Транспортировка наддрессорной балки на позицию сборки тележки	Transport_6	1,00	Operator_2	UNIFORM (6,7; 7,3)	UNIFORM (6,7; 7,3)

* UNIFORM (min, max) – теоретическое распределение равной вероятности случайной величины; min, max – минимальное и максимальное значения времени выполнения технологической операции.

** NORMAL (Mean, StdDev) – теоретическое нормальное распределение вероятности случайной величины; Mean, StdDev – среднее значение и среднеквадратическое отклонение случайной величины.

Увеличение пропускной способности данного технологического подпроцесса возможно в результате реализации следующих организационно-технических мероприятий.

1. Полная замена технологического оборудования на ремонтных позициях, что приведет к снижению соответствующих значений T_{TO} (вариант 1/Модель 2).

2. Организация дополнительной дублирующей ремонтной позиции для технологической операции с наибольшей трудоемкостью (см. таблицу 1) – операции «Механическая обработка подпятника надрессорной балки» (вариант 2/Модель 3).

3. Организация «свободной маршрутизации» обрабатываемой балки внутри ремонтных позиций наплавки/сварки и механообработки (вариант 3/Модель 4).

Выбор наиболее приемлемого для возможной последующей реализации варианта реинжиниринга предлагается осуществлять на основе сравнения результатов имитационного моделирования функционирования соответствующих технологических подпроцессов в среде Arena RockWellSoftwareTM (академическая лицензия). Сравнение осуществляется также с аналогичными результатами, полученными на «Модели 1», модели «AS IS», которая разработана для исходного технологического подпроцесса ремонта надрессорной балки (см. таблицу 1). Модели 2 – 4 относятся к категории моделей «AS TO BE». Результаты моделирования включают в себя количественные оценки перечисленных ранее показателей для каждого из вариантов. Для всех моделей требованием на обслуживание является надрессорная балка, поступающая на ремонт с операции разборки тележки. Функционирование последней в таком контексте моделируется работой функционального блока типа Create «Create 1» (рисунки 1–3), так как известно соответствующее технологическое время этой операции. Комбинация блоков «Decide 1» и «Hold 1» предназначена для моделирования накопления надрессорных балок после разборки тележки на межоперационном складе.

В моделях «Модель 1», «Модель 3», «Модель 4» на ремонтных операциях используется оборудование, указанное в таблице 1, в моделях «Модель 2» и частично в «Модель 4» на соответствующих ремонтных операциях используется оборудование с более высокими технологическими характеристиками (см. таблицу 1). При построении всех моделей эксплуатационные отказы оборудования не учитываются.

В качестве ресурса для блоков типа Process, которые имитируют функционирование соответствующих ремонтных операций, выступают рабочие (см. таблицу 1). Последние задей-

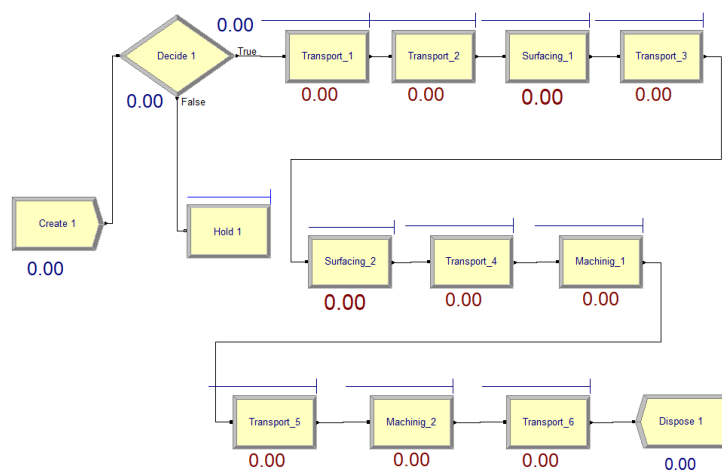


Рисунок 1 – Модель «AS IS» действующего подпроцесса ремонта надрессорной балки тележки модели 18-578 полувагона («Модель 1»)

ствованы в технологических операциях в течение 11 часов (08.00 – 19.00) с двумя перерывами: с 11.30 до 12.30 и с 15.30 до 16.00. Управление доступом блоков типа Process к каждому из ресурсов осуществляется специальным блоком типа Schedule. Если при наступлении перерывов рабочие выполняют свои операции, то они их завершают и лишь после этого они прерывают свою деятельность, т. е. для соответствующих функциональных блоков Process мо-

дели рабочие, как используемый блоками ресурс, становятся недоступны.

Эту ситуация соответствует опции Wait при настройке блока Schedule, которая используется при описании доступности ресурсов в целом для блоков типа Process. Данная опция автоматически «продляет перерыв» для каждого рабочего (ресурса) на то время, на которое он задержался для выполнения операции в момент наступления перерыва. В таком же режиме работают все рабочие (ресурсы), включая и тех, что обеспечивают транспортировку надрессорной балки – операции Transport, функционирование которых также имитирует блоки типа Process.

«Модель 2» для варианта 1 отличается от модели «AS IS» только лишь величинами T_{TO} , которые соответствуют более производительному оборудованию, которое будет использоваться на соответствующих ремонтных позициях (см. таблицу 1).

На рисунке 2 приведена «Модель 3» для варианта 2, в которой присутствует дублирование самой трудоемкой операции «Механическая обработка подпятника надрессорной балки (Machining_2)» (см. таблицу 1). В том случае, если эта операция занята обслуживанием требования, то пришедшее на обслуживание требование направляется на дублирующую операцию Machining_3 через блок Decide_2.

В документе [9] не указаны какие бы то ни было ограничения на последовательность выполнения при ремонте тележки как операций наплавки Surfacing_1, Surfacing_2, так и операций механообработки Machining_1, Machining_2 (см. таблицу 1). «Модель 4» (рисунок 3)

позволяет перенаправлять поступающие на обслуживание требования на свободную операцию типа Surfacing_1 или Surfacing_2. Совокупность блоков Assign 1, Assign 2, Decide 3 и Decide 4 обеспечивает контроль обязательного прохождения требования через операции типа Surfacing_1 и Surfacing_2, т. е. до тех пор, пока поступившая на ремонт надрессорная балка не пройдет операции наплавки подпятника и боковых поверхностей, она не поступит на последующие операции механообработки Machining_1 и Machining_2.

Блоки Decide 5 и Decide 6 обеспечивают распределение поступающих после наплавки балок на свободные операции механообработки. Блок Hold 2 предназначен для имитации функционирования локального межоперационного склада этих операций, где накапливаются надрессорные балки, прошедшие обработку на операциях наплавки, при занятых обработкой ранее поступивших балок операциях механообработки.

Балки с данного склада всегда поступают на операцию Machining_1, которая характеризуется меньшим технологическим временем по сравнению с операцией Machining_2. Группа блоков Assign 3, Assign 4, Decide 7 и Decide 8 выполняет те же функции, что блоки Assign 1, Assign 2, Decide 3, Decide 4, но уже применительно к операциям механообработки. Операция Transport_6 имитирует транспортирование отремонтированных надрессорных балок на позицию сборки тележки. Функциональные блоки типа Hold, Decide и Assign не оказывают влия-

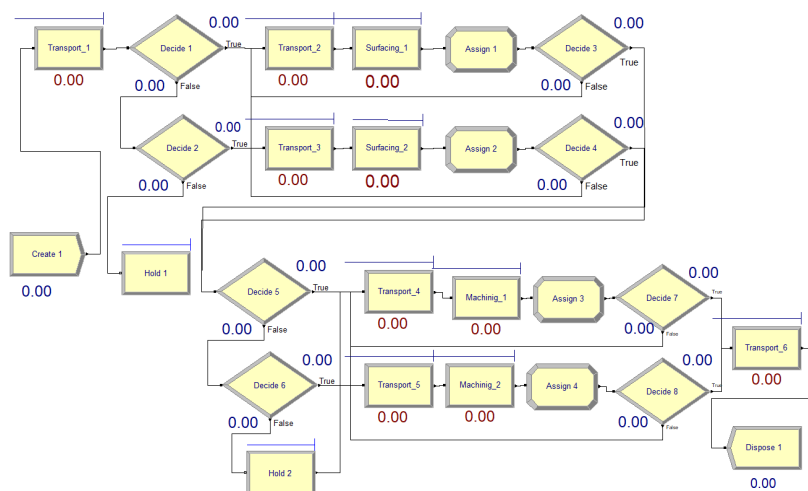


Рисунок 2 – Модель «AS TO BE» (Модель 3) подпроцесса ремонта надрессорной балки тележки модели 18-578 полувагона, предусматривающая загрузку свободных ремонтных позиций

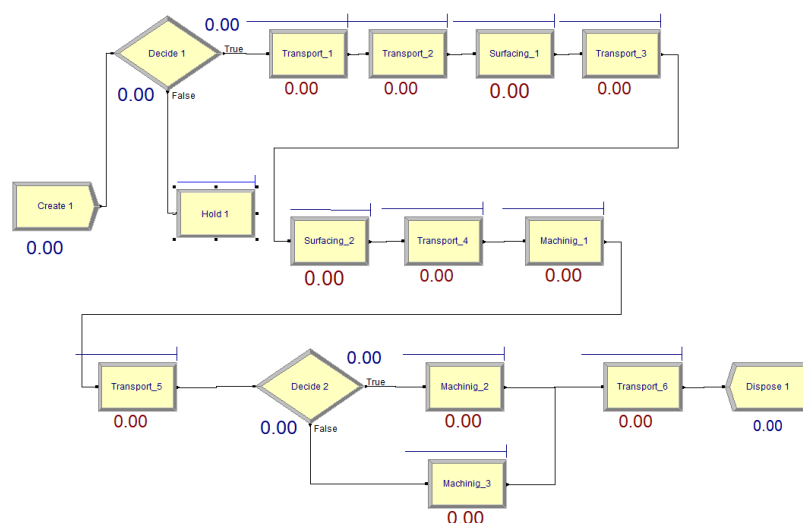


Рисунок 3 – Модель «AS TO BE» (Модель 4) подпроцесса ремонта надрессорной балки тележки модели 18-578 полувагона, предусматривающая дублирование наиболее трудоемкой операции Machining_2

ния на величину технологического времени ремонта надressорной балки тележки на ремонтных позициях, так как они предназначены для описания дисциплины и логики обслуживания требований в моделях Arena.

В таблице 2 приведены результаты имитационного моделирования функционирования вариантов реинжиниринга рассматриваемого технологического подпроцесса с использованием соответствующих разработанных моделей, описанных выше. Согласно полученным результатам моделирования наиболее привлекательным для последующей практической реализации реинжиниринга представляется вариант 4 («Модель 4»), который характеризуется как максимальной пропускной способностью рассматриваемого технологического подпроцесса, так и наименьшими показателями незавершенного производства на момент завершения рабочей смены.

Таблица 2 – Расчетные значения показателей функционирования вариантов реинжиниринга подпроцесса ремонта надressорной балки

№ п/п	Показатель/критерий	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
1	Отремонтировано надressорных балок, шт.	11	12	12	14
2	Незавершенное производство (всего), шт.	7	9	6	4
	В том числе технологические операции	7	9	6	4
3	Средняя степень загрузки оборудования технологических операций	0,745	0,767	0,76	0,616
4	Затраты на реинжиниринг (затраты на приобретение оборудования), тыс. руб.	–	32643	–	5250
5	Количество занятых рабочих (используемых ресурсов), чел.	7	7	7	8

Вместе с тем данный вариант по отношению к варианту 3 (ближайший альтернативный вариант) предполагает необходимость дополнительных инвестиций на приобретение оборудования для оснащения операции Machining_3 и найма дополнительного персонала (рабочего) для работы на нем. Кроме того, данный вариант характеризуется наименьшей степенью загрузки оборудования.

Более детальная информация о степени загрузки рабочих (ресурсов), выполняющих непосредственно соответствующие ремонтные (технологические) операции (см. таблицу 1), приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Загрузка ресурсов ремонтных операций подпроцесса ремонта надressорной балки за смену

Степень загрузки ресурса ремонтных операций	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
Welder_1	0,78	0,78	0,83	0,78
Welder_2	0,83	0,88	0,87	0,87
Craftsman_2	0,55	0,59	0,51	0,55
Craftsman_3	0,82	0,82	0,83	0,44
Craftsman_4	–	–	–	0,44

Рост степени загрузки сварщика (Welder_1) на операции Surfacing_1 (см. таблицу 1) обусловлена тем, что маршрутизация поступающих на ремонт надressорных балок не строго регламентирована и так как $T_{то}$ данной операции меньше, чем на операции Surfacing_2, то количество надressорных балок поступающих на данную операцию увеличивается. Введение же дублирующей операции Machining_3 для операции Machining_2 снижает загрузку используемых на этих операциях соответствующих ресурсов (рабочих) Craftsman_4 и Craftsman_3. В остальном же загрузка ресурсов для приведенных моделей (см. таблицу 3) незначительно отличается друг от друга.

Использование имитационного моделирования в рамках реинжиниринга бизнес-процессов организационно-технических систем, включая и технологические процессы, позволяет получать количественные оценки ряда ключевых показателей, характеризующих возможную реализацию каждого из вариантов рассматриваемого ТП, его подпроцессов и операций. К этим показателям, как правило, принято относить производительность (пропускную способность) ТП, степень загрузки используемых ресурсов (оборудования, персонала), величину незавершенного производства и т. п., т. е. те показатели, что используются как при проектировании технологических процессов, так и при их сопровождении в условиях действующего производства. Имитационные модели функционирования вариантов реинжиниринга ТП разрабатываются с учетом дисциплины и технологической специфики их реализации. Полученные в результате имитационного моделирования оценки перечисленных выше показателей являются основой для принятия более обоснованных управленческих решений по выбору и последующей реализации наиболее приемлемого из сравниваемых варианта реинжиниринга рассматриваемого технологического процесса или его элементов. Применительно к рассмотренному подпроцессу ремонта надрессорной балки тележки модели 18-578 полувагона наиболее предпочтительным является вариант реинжиниринга, характеризующийся организацией дополнительной ремонтной операции механообработки наплавленного подпятника надрессорной балки (Machining_3) (см. таблицы 2, 3).

Список литературы

1. Kelton W. D. Simulation with Arena, 5th Edition by W. David Kelton, Randall P. Sadowski, Nancy B. Swets, *Rockwell Automation McGraw-Hill*, 2010, 656 p.
2. Высочина, О. С. Моделирование производственных процессов на промышленном предприятии при помощи системы имитационного моделирования Arena / О. С. Высочина, В. Н. Данич, В. П. Пархоменко. – Текст : непосредственный // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2012. – № 1. – С. 82 – 85.
3. Редько, С. Г. Применение системы имитационного моделирования Arena для исследования производственных линий / С. Г. Редько, Е. В. Селезнева. – Текст : непосредственный // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. – 2013. – № 4-2 (183). – С. 277 – 283.
4. Ревина, И. В. Имитационное моделирование производственного процесса изготовления деталей / И. В. Ревина, Г. Н. Бояркин. – Текст : непосредственный // *Омский научный вестник*. – 2018. – № 6 (162). – С. 230 – 234.
5. Брылова, Т. Б. Имитационное моделирование функционирования технологических процессов ремонта узлов подвижного состава / Т. Б. Брылова, А. В. Кутышкин. – Текст : непосредственный // *Известия Транссиба*. – 2019. – № 2 (38). – С. 117 – 127.
6. Имитационное моделирование производственных систем / под общ. ред. чл.-кор. АН СССР А. А. Вавилова. – Москва : Машиностроение; Берлин : Техника, 1983. – 416 с. – Текст : непосредственный.
7. Смирнов, В. А. Имитационное моделирование технологических процессов предприятий транспортного машиностроения / В. А. Смирнов, А. М. Семенов. – Текст : непосредственный // *Вестник РГУПС*. – 2012. – № 2 (46). – С. 67 – 74.
8. Смирнов, В. А. Оценка производственно-технологических параметров предприятий по ремонту подвижного состава методами математического моделирования / В. А. Смирнов, А. М. Семенов. – Текст : непосредственный // *Вестник РГУПС*. – 2012. – № 4 (48). – С. 45 – 53.
9. Общее руководство по ремонту РД 32 ЦВ 082-2018 «Тележки трехэлементные грузовых вагонов со скользунами постоянного контакта с осевой нагрузкой 23,5 тс моделей 18-578 и 18-9771». – Москва : ОАО «РЖД», 2018. – 95 с. – Текст : непосредственный.
10. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В. С. Королук, Н. И. Портенко [и др.]. – Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 640 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Kelton W. D. Simulation with Arena, 5th Edition by W. David Kelton, Randall P. Sadowski, Nancy B. Swets, *Rockwell Automation McGraw-Hill*, 2010, 656 p.
2. Vysochina O. S., Danich V. N., Parhomenko V. P. Simulation of production processes at an industrial enterprise using the Arena simulation system [Modelirovanie proizvodstvennykh processov na promyshlennom predpriyatii pri pomoshchi sistemy imitacionnogo modelirovaniya Arena]. *Radioelektronika, informatika, upravlinnya – Radio electronics, informatics, management*, 2012, no. 1, pp. 82 – 85.
3. Redko S. G., Selezneva E. V. Application of the Arena simulation system to research production lines [Primenenie sistemy imitacionnogo modelirovaniya Arena dlya issledovaniya proizvodstvennykh liniy]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Cankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta – Scientific and technical statements of St. Petersburg State Polytechnic University*, 2013, no. 4-2 (183), pp. 277 – 283.
4. Revina I. V., Boyarkin G. N. Simulation of the production process of manufacturing parts [Imitacionnoe modelirovanie proizvodstvennogo processa izgotovleniya detalej]. *Omskij nauchnyy vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 6 (162), pp. 230 – 234.
5. Brylova T. B., Kutyskin A. V. Simulation modeling of the functioning of technological processes of repair of rolling stock units [Imitacionnoe modelirovanie funkcionirovaniya tekhnologicheskikh processov remonta uzlov podvizhnogo sostava]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 2 (38), pp. 117 – 127.
6. *Imitacionnoe modelirovanie proizvodstvennykh sistem* (Simulation of production systems), Under total. ed. Corresponding Member USSR Academy of Sciences A. A. Vavilova. Moscow: Mashinostroenie Publ.; Berlin: Tekhnika Publ., 1983, 416 p.
7. Smirnov V. A., Semenov A. M. Simulation modeling of technological processes of enterprises of transport engineering [Imitacionnoe modelirovanie tekhnologicheskikh processov predpriyatij transportnogo mashinostroeniya]. *Vestnik RGUPS – Bulletin of the Rostov State University of Communications*, 2012, no. 2 (46), pp. 67 – 74.
8. Smirnov V. A., Semenov A. M. Evaluation of production and technological parameters of enterprises for the repair of rolling stock methods of mathematical modeling [Ocenka proizvodstvenno-tekhnologicheskikh parametrov predpriyatij po remontu podvizhnogo sostava metodami matematicheskogo modelirovaniya]. *Vestnik RGUPS – Bulletin of the Rostov State University of Communications*, 2012, no. 4 (48), pp. 45 – 53.
9. *Obshchee rukovodstvo po remontu RD 32 TsV 082-2018 «Telezhki trekhelementnye gruzovyykh vagonov so skol'zunami postoiannogo kontakta s osevoi nagruzkoi 23,5 ts modelei 18-578 i 18-9771»* (General repair manual RD 32 CV 082-2018 " Three-element bogies of freight cars with constant contact sliders with an axial load of 23.5 ts models 18-578 and 18-9771»), Moscow: JSC «RZhD» Publ., 2018, 95 p.
10. Korolyuk V. S., Portenko N. I., Skorohod A. V., Turbin A. F. *Spravochnik po teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistike* (Handbook of Probability and Mathematical Statistics). Moscow: Science. Main editorial office of physical and mathematical literature, 1985, 640 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Брылова Татьяна Борисовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-72.

E-mail: biser65@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Brylova Tatyana Borisovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Wagons and wagon industry», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-72.

E-mail: biser65@mail.ru

Кутышкин Андрей Валентинович

Югорский государственный университет (ЮГУ).
Чехова ул., 16, г. Ханты-Мансийск, 628012, Рос-
сийская Федерация.

Доктор технических наук, профессор Высшей
цифровой школы Института цифровой экономики,
ЮГУ.

Тел.: +7 (3467) 35-77-15, 35-75-38.

E-mail: avk_200761@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Брылова, Т. Б. Использование имитационного
моделирования при реинжиниринге технологических
процессов ремонта подвижного состава / Т. Б. Брыло-
ва, А. В. Кутышкин. – Текст : непосредственный // Из-
вестия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 139 – 148.

Kutyshkin Andrey Valentinovich

Yugra State University (YGU).
16, Chehova st., Khanty-Mansiysk, 628012, the
Russian Federation.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of the
Higher Digital School of the Institute of Digital Economy,
YGU.

Phones: +7 (3467) 35-77-15, 35-75-38.

E-mail: avk_200761@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Brylova T. B., Kutyshkin A. V. The use of simulation
in the reengineering of technological processes of rolling
stock units. Journal of Transsib Railway Studies, 2020,
no. 3 (43), pp. 139 – 148 (In Russian).

УДК 658.012.011.56:658.512

С. Н. Харлап

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

ПРИМЕНЕНИЕ ДИВЕРСИТЕТА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ОПАСНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ К СИСТЕМАТИЧЕСКИМ ОТКАЗАМ

Аннотация. Рассмотрено влияние систематических отказов на функциональную безопасность автома-
тизированных систем управления опасными технологическими процессами. Показано, что обеспечение устой-
чивости АСУ ТП к систематическим отказам в настоящее время является актуальной задачей. Представле-
ны подходы для повышения устойчивости к систематическим отказам, рекомендованные МЭК 61508. Особое
внимание уделено методам, базирующимся на диверситете. Подробно раскрыты функциональный диверситет
и диверситет технологий. Приведены примеры использования диверситета в системах железнодорожной ав-
томатики. Сформулированы основные проблемы применения диверситета для повышения устойчивости к
систематическим отказам. Основными преимуществами использования диверситета являются повышение
стойкости к систематическим отказам и снижение риска возникновения опасных отказов за счет примене-
ния диверситетных методов защиты на функциональных уровнях АСУ ТП. Недостатками использования ди-
верситета являются значительное увеличение затрат на разработку и техническое обслуживание АСУ ТП,
сложность подтверждения различного поведения диверситетных каналов при возникновении систематиче-
ских отказов и отсутствие эффективного метода оценки достаточности полученного диверситета для за-
данного уровня полноты безопасности.

Ключевые слова: диверситет, безопасность, АСУ ТП, систематические отказы, опасный отказ.

Sergei N. Kharlap

Belarusian State University Of Transport (BSUT), Gomel, the Republic of Belarus

APPLICATION OF DIVERSITY IN AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF HAZARDOUS TECHNOLOGICAL PROCESSES TO INCREASE RESISTANCE TO SYSTEMATIC FAILURES

Abstract. The influence of systematic failures to the functional safety of automated control systems of hazardous
technological processes is considered. It is shown that stability ensuring of the process control system to systematic
failures is an actual task for today. Approaches to increase the robustness to systematic failures recommended by
IEC 61508 are presented. Special attention is paid to methods based on diversion. The functional diversity and technol-
ogy diversity have been revealed in detail. Examples of using diversification in railway automation systems are given.
The main problems of using diversification to increase resistance to systematic failures are formulated. The main ad-
vantages of using diversification are increased resistance to systematic failures and reduced risk of dangerous failures
through the usage of diversified protection methods at the functional levels of the APCS. The disadvantages of using
diversification are a significant increase in the costs of developing and automated process control system maintenance,

the difficulty of confirming the different behavior of diversified channels in case of systematic failures, and the lack of an effective method to assessing the sufficiency of the obtained diversification for a given level of safety integrity.

Keywords: diversity, safety, process control systems, systematic failures, dangerous failure.

Многие области деятельности человека (транспорт, промышленность, энергетика, научные исследования, медицина и пр.) непрерывно усложняются, оснащаются сложным технологическим оборудованием с широким использованием информационных технологий. Одновременно они становятся все более опасными для сотрудников, населения и окружающей среды. На системы управления все в большей степени начинают возлагать функции надежного и достоверного контроля состояния технологического процесса и предупреждения возникновения аварийных ситуаций, обеспечивая тем самым снижение рисков и опасностей этих отраслей.

Над такого рода «ответственными» (*mission-critical*) системами работает целая отрасль, в которую вкладываются значительные средства и где сосредоточено значительное количество высококвалифицированных специалистов, надлежащим образом организована система менеджмента качества, отлажены процессы разработки и контроля. И тем не менее в мире постоянно происходят катастрофы, большие и малые аварии, уносящие жизни людей, приводящие к значительным материальным потерям и нарушающие экологический баланс. Причины этих катастроф различны, но абсолютное их большинство обусловлено отказами технических средств и человеческими ошибками при разработке и эксплуатации автоматизированных систем управления.

В связи с этим важнейшей характеристикой современных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) является функциональная безопасность. Функциональной безопасностью называют часть общей безопасности, которая относится к системам управления объектами и зависит от правильности функционирования систем, связанных с обеспечением безопасности [1]. Другими словами, функциональная безопасность – это способность системы в процессе своего функционирования не подвергать опасности человеческую жизнь, экономику и окружающую среду при возникновении отказов аппаратуры, ошибках в программном обеспечении или неверных действиях оператора. Таким образом, функциональная безопасность характеризует надежность и отказоустойчивость аппаратуры, корректность программного обеспечения и защищенность от ошибок персонала.

По данным компании *Ernst&Young* [2] наиболее частыми причинами отказов важных информационных систем являлись отказы аппаратуры, искажение информации в каналах связи, включая отказы коммуникационного оборудования, и программные ошибки (рисунок 1).



Рисунок 1 – Причины отказов важных информационных систем

Несмотря на то, что доля отказов, связанных с аппаратным обеспечением и искажением информации, остается самой большой, это не вызывает особых проблем, так как пути их решения известны и успешно реализуются. Надежность электронных компонентов неуклонно растет, а стоимость снижается, что позволяет широко использовать более совершенные и избыточные методы резервирования. Кроме того, широкое использование программной реализации функций контроля и управления ответственными объектами, диагностики состояния оборудования, предупреждения аварийных ситуаций позволяет значительно сократить количество используемых электронных компонентов, повышая общую надежность систем управления.

Однако широкое использование программного обеспечения для реализации ответственных функций привело к тому, что все чаще причиной аварий становится ненадлежащее функционирование компьютерных систем и, в частности, их программного обеспечения. Оборона, транспорт и космос, медицина, технологические процессы на современных ядерных, химических и других производствах – вот неполный перечень тех предметных областей, где низкое качество программного обеспечения и даже единичные дефекты в нем приводят к потере человеческих жизней и разрушению материальных ценностей.

К программным ошибкам следует добавить человеческие ошибки во время проектирования и изготовления аппаратных средств, интеграции программного и аппаратного обеспечения, а также эксплуатации системы в целом. Познавательной является информация британского агентства *Health Safety Executive* [3] о распределении между этапами жизненного цикла АСУ ТП человеческих ошибок, ставших ключевыми причинами аварий (рисунок 2).

Этапы жизненного цикла АСУ ТП

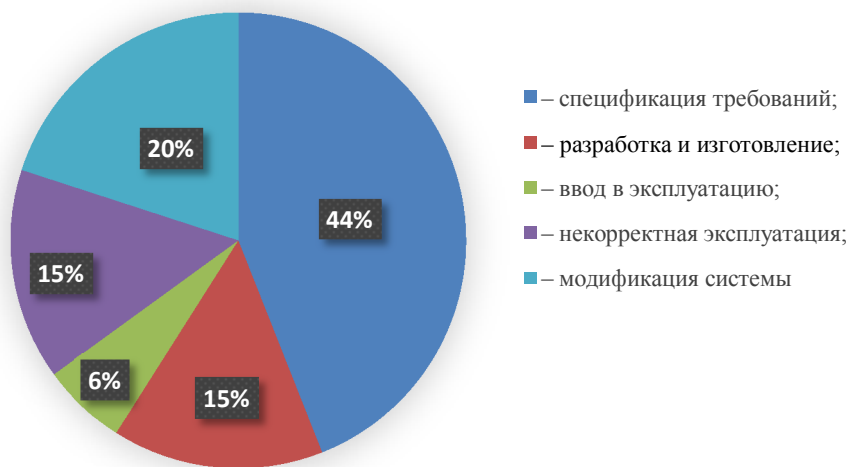


Рисунок 2 – Распределение человеческих ошибок между этапами жизненного цикла АСУ ТП

Как видно из диаграммы на рисунке 2, почти половина ошибок вносится на этапе формирования спецификации требований. Значительное их число приходится на этапы разработки, изготовления и модификации существующих систем, эксплуатацию и техническое обслуживание.

Ошибки человека при проектировании, изготовлении (реализации) и эксплуатации аппаратных средств и программного обеспечения называют систематическими отказами [1] в отличие от случайных отказов аппаратных средств. Обеспечение устойчивости АСУ ТП к систематическим отказам в настоящее время является одной из самых важных задач.

Перечислить каждую причину систематических отказов, источники которых возникают на протяжении всех стадий жизненного цикла, и каждое средство защиты достаточно сложно по следующим причинам [4]: влияние систематических ошибок зависит от стадии жизненно-

го цикла, на которой они вносятся, и эффективность любой конкретной меры или средства по предотвращению отказов зависит от их применения.

В то же время в соответствии с требованиями ГОСТа [4] при проектировании безопасной системы управления должна быть обеспечена устойчивость

- к любым остаточным ошибкам проектирования аппаратных средств, если вероятность ошибок проектирования аппаратных средств не может быть исключена;
- внешним влияниям, включая электромагнитные воздействия;
- ошибкам человека-оператора при эксплуатации системы;
- любым остаточным ошибкам в программном обеспечении;
- любым ошибкам, возникающим в результате выполнения любого процесса передачи данных.

В связи с этим основными источниками систематических отказов принято считать

отказы, вызванные ошибками человека, возникающими на этапах разработки и изготовления системы (например, ошибки спецификации, ошибки программного обеспечения; ошибки при проектировании и изготовлении аппаратных средств);

отказы, вызванные ошибками, возникающими во время эксплуатации системы (например, отказы, вызванные неправильным использованием оборудования).

Для предотвращения таких отказов или уменьшения их влияния на безопасность требуется применение большого числа различных средств и методов. Основные принципы обеспечения безопасного функционирования систем управления технологическими процессами определяются концепцией, принятой разработчиком. Наибольшее распространение получила следующая концепция обеспечения безопасности [5]: «Одиночные отказы аппаратных и программных средств не должны приводить к опасным отказам и должны обнаруживаться при рабочих и тестовых воздействиях до того, как в системе произойдет второй отказ».

В настоящее время положения данной концепции реализуются по двум направлениям: выполнение специальных мероприятий по защите от опасных отказов на отдельных функциональных уровнях АСУ ТП и предотвращение опасных отказов за счет многоуровневой эшелонированной защиты («Защита в глубину»). Такой подход обеспечивает многообразие путей решения проблемы обеспечения заданных показателей функциональной безопасности, однако окончательный выбор методов и средств защиты всегда остается за разработчиком системы.

Основным способом защиты от опасных отказов на отдельных функциональных уровнях АСУ ТП является параллельное выполнение ответственных функций в нескольких вычислительных каналах (многоканальная обработка) с последующим сравнением результатов. Если различные каналы формируют одинаковые управляющие воздействия, то считается, что система корректно выполняет свои функции. При обнаружении расхождения в результатах принимается решение о наличии отказа в системе и выполняется ее отключение (переход в безопасное состояние). При таком подходе любые одиночные отказы не могут привести к опасному отказу, так как выработка опасного управляющего воздействия блокируется вторым исправным каналом. Переход в защитное состояние гарантирует, что к опасным последствиям не приведут последующие отказы. Многоканальная обработка нашла широкое применение в различных системах железнодорожной автоматики, например, в системах микропроцессорной централизации *Ebilock 950* [6], *ESA 44-BC*, «Путь» [5], «Днепр» и др.

Однако безопасность многоканальных систем базируется на предположении независимости отказов (случайных и систематических) в различных каналах, т. е. любой одиночный отказ нарушает корректную работу только одного из каналов, при этом второй канал должен корректно выполнять свои функции.

Опасным отказом в многоканальных системах считается отказ, при котором несколько каналов одновременно сформируют одинаково неверные управляющие воздействия. Это может быть вызвано как отказами по общей причине, которые мы в данной статье не рассматриваем, так и систематическими отказами. Например, если в вычислительных каналах

используется одинаковое программное обеспечение, то любая ошибка будет проявляться одинаково и не будет обнаружена схемами сравнения. Таким образом, ошибка человека на стадиях разработки и изготовления системы становится опасной, если она проявится в нескольких каналах одинаковым образом.

Для исключения таких последствий существует два основных подхода
многоступенчатый контроль всех стадий разработки аппаратных и программных средств;

обеспечение достаточной независимости разработки аппаратных и программных средств для различных каналов многоканальной системы. В этом случае предполагается, что допущенные при разработке ошибки человека проявят себя в разных каналах по-разному, что позволит при сравнении результатов работы каналов их обнаружить и обеспечить переход в защитное состояние.

Для достижения достаточной независимости разработки аппаратных и программных средств для различных каналов многоканальной системы МЭК 61508 рекомендует использовать следующие методы [7]:

функциональное разнообразие (*diversity* – диверситет): использование различных подходов для достижения одинаковых результатов;

разнообразие (диверситет) технологий: использование различных типов аппаратного и программного обеспечения для достижения одинаковых результатов;

отсутствие общих компонентов: обеспечение отсутствия общих компонентов или систем поддержки (например, электропитания), отказ которых может привести к опасному отказу всей системы;

отсутствие общих процедур: обеспечение отсутствия общих процедур при эксплуатации, техническом обслуживании или тестировании.

Рассмотрим эти методы с точки зрения влияния на устойчивость к систематическим отказам. Функциональный диверситет базируется на том, что модули разных каналов, выполняющие одинаковые функции, реализуются разными способами. В этом случае систематические отказы, вызвавшие отказ одного из каналов, либо не повлияют на работу второго канала, либо приведут к тому, что последствия отказов в разных каналах будут различными. При достаточном уровне диверситета даже при одновременных отказах каналов они сформируют различные управляющие воздействия, что будет обнаружено внешней схемой сравнения и вызовет переход в защитное состояние.

Применение функционального диверситета приводит к разработке различных спецификаций для каждого канала, различающихся набором функций, алгоритмами, схемными решениями. Любая ошибка, возникшая при разработке спецификации, коснется только одного вычислительного канала и не будет перенесена во второй канал. То же самое произойдет и при проектировании, программировании и изготовлении каналов, так как каждый канал будет разрабатываться по отдельным спецификациям. Пример разработки программного обеспечения по различным спецификациям приведен в статье [8]. В настоящее время существуют диверситетные реализации типовых задач автоматического управления, которые могут быть описаны функциями алгебры логики или конечными автоматами [9]. Данный метод не устраняет ошибок, не выявленных при проектировании, а также ошибок в интерпретации спецификации, однако он является средством для обнаружения и маскирования ошибок и исключает их влияние на безопасность. Недостатком такого подхода является как минимум удвоение затрат на разработку.

Диверситет технологий предполагает использование различных типов аппаратного и программного обеспечения для достижения одинаковых результатов. Аппаратный диверситет может быть реализован применением в различных каналах компонентов с различными частотами и типами отказов. Примером аппаратного диверситета может служить построение различных каналов на базе

– электронных и релейных компонентов;

- цифровых и аналоговых элементов;
- жесткой и программируемой логики;
- микроконтроллеров, использующих различные архитектуры и т. п.

Программный диверситет технологий может быть достигнут использованием различных

- языков программирования;
- сред разработки;
- операционных систем.

Диверситет технологий практически всегда дополняется правилом о том, что аппаратные и программные средства различных каналов должны разрабатывать различные группы разработчиков. В этом случае предполагается, что даже отталкиваясь от одной и той же спецификации требований, разные разработчики если и допустят ошибки, то эти ошибки проявятся по-разному и будут обнаружены при сравнении работы каналов. Использование различных языков и сред программирования только усиливают этот эффект. Как и в случае с функциональным диверситетом, этот метод очень затратен, так как подразумевает финансирование еще одной параллельной разработки.

Средства защиты	Уровни защиты
План реагирования на чрезвычайные ситуации	Уровень аварийного реагирования
Физические барьеры	Уровень пассивной защиты
Устройства аварийного отключения	Уровень активной защиты
Локальные устройства защитного отключения	Уровень защитного отключения
	Уровень контроля безопасности технологического процесса (останов процесса)
Система управления технологическим процессом	Уровень управления технологическим процессом (нормальное состояние процесса)

Рисунок 3 – Типовые уровни защиты в глубину АСУ ТП критического техногенного объекта

На практике часто объединяют эти подходы, когда каналы проектируют различные группы разработчиков по отличающимся спецификациям (функциональный диверситет) с применением различных операционных систем, языков и сред программирования (диверситет технологий).

В настоящее время наиболее перспективным для управления рисками считается принцип «Защита в глубину» (*Defense-in-Depth*) (рисунок 3), который заключается в том, что в системе должен применяться набор разнотипных (диверситетных) методов защиты с тем, чтобы инцидент либо авария на объекте контроля и управления не мог пройти все уровни защиты. В этом случае широко применяется диверситет технологий.

Например, на атомном энергоблоке [3] (рисунок 4)

при выходе за установленные пределы параметров процесса, таких как температура или давление, включаются локальные технологические защиты и блокировки. Если это не помогло, то осуществляется аварийный останов реактора. При этом если развитие нежелательного процесса зашло достаточно далеко, то необходимо продолжать управление по предотвращению аварии, например, путем активации системы аварийного охлаждения. Если авария развивается дальше и происходит взрыв, то распространению радиоактивных веществ противостоят средства пассивной защиты, такие как корпус реактора. Если радиоактивные вещества все же попали в окружающую среду, то в работу включаются группы по ликвидации последствий аварии.

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Уровни защиты	Средства защиты атомного энергоблока	Средства защиты системы переездной автоматики
Уровень аварийного реагирования	Группы по ликвидации последствий аварии	Инструкция по эксплуатации железнодорожных переездов
Уровень пассивной защиты	Корпус реактора	Устройства заграждения переезда
Уровень активной защиты	Активация системы аварийного охлаждения	Включение заградительной сигнализации
Уровень защитного отключения	Аварийный останов реактора	Переход на ручное управление переездом
Уровень контроля безопасности технологического процесса (останов процесса)	Локальные технологические защиты и блокировки	Контроль целостности нитей ламп переездных светофоров
Уровень управления технологическим процессом (нормальное состояние процесса)	Система управления технологическим процессом	Система управления технологическим процессом

Рисунок 4 – Примеры разнообразия средств защиты на различных уровнях

Во многом аналогичный подход используется и в системах железнодорожной автоматики (см. рисунок 4). При отказе отдельных устройств (например, при перегорании лампы переездного светофора) система управления пытается компенсировать последствия отказа соответствующими технологическими алгоритмами (автоматической подачей извещения о неисправности на переезде). При невозможности компенсировать последствия отказа система переходит в режим ручного управления, когда разрешено прямое управление объектами, а обеспечение безопасности возлагается на человека-оператора. В случае критической ситуации система обеспечивает включение заградительной сигнализации. Кроме того, могут дополнительно применяться пассивные методы защиты, например, устройства заграждения переезда для исключения несанкционированного въезда транспортных средств в зону огражденного переезда. В случае аварийного отказа в соответствии с условиями эксплуатации железнодорожных переездов (утв. приказом Минтранса России от 31.07.2015 № 237) дежурный по станции или поездной диспетчер по радиосвязи немедленно передает сообщение машинистам поездов о неисправности устройств автоматики на переезде и необходимости проследования его с особой бдительностью и скоростью не более 20 км/ч.

Следует учитывать, что в стандартах предлагаются только общие подходы к достижению диверситета, рассмотренные в этой статье. К сожалению, эксперименты и аналитические исследования показывают, что применение диверситета не всегда столь эффективно, как хотелось бы. Независимость версий, являющуюся основой для диверситета, на практике довольно трудно достичь и продемонстрировать. Даже если используются различные функциональные элементы и алгоритмы, привлекаются различные коллективы разработчиков, разные версии аппаратного и программного обеспечения слишком часто имеют одинаковые реакции при проявлении внутренних ошибок или искажении внешних данных.

В последнее время получил распространение комплексный подход, при котором одновременно используются аппаратный и программный диверситеты. В этом случае в разных каналах обработки информации, на разных уровнях защиты от опасных отказов используют-

ся различные аппаратные средства с загруженными в них диверситетными программами. Такой подход позволяет объединить преимущества обоих методов и обеспечить защиту как от систематических отказов при разработке аппаратных средств, так и от ошибок программного обеспечения.

В качестве выводов следует отметить, что основными преимуществами использования диверситета являются такие:

повышение стойкости к систематическим отказам в процессе проектирования, реализации, эксплуатации и технического обслуживания аппаратных и программных средств;

снижение риска возникновения опасных отказов за счет применения разнотипных (диверситетных) методов защиты на функциональных уровнях АСУ ТП.

К недостаткам использования диверситета можно отнести следующее:

значительное (в несколько раз) увеличение затрат на разработку и техническое обслуживание АСУ ТП, что является основным сдерживающим фактором его широкого использования;

сложность подтверждения различного поведения диверситетных каналов при возникновении систематических отказов проектирования, реализации аппаратных средств и ошибок в программном обеспечении;

независимо от подхода в настоящее время нет эффективного метода, оценивающего уровень разнообразия (диверситета), и, как следствие, методов оценки достаточности полученного диверситета для заданного уровня полноты безопасности [10].

Однако следует отметить, что альтернативные методы решения задачи повышения стойкости к систематическим отказам не менее затратны и сложны. При этом каждый из альтернативных методов в отличие от диверситета решает только часть описанных выше проблем. Поэтому, несмотря на указанные недостатки, применение диверситета в автоматизированных системах управления опасными технологическими процессами является полностью оправданным.

Список литературы

1. ГОСТ Р МЭК 61508-4-2012 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 4. Термины и определения». – Москва : Стандартинформ, 2014. – 28 с. – Текст : непосредственный.
2. Липаев, В. В. Функциональная безопасность программных средств / В. В. Липаев. – Москва : СИНТЕГ, 2004. – 348 с. – Текст : непосредственный.
3. Складар, В. В. Обеспечение безопасности АСУ ТП в соответствии с современными стандартами : методическое пособие / В. В. Складар. – Москва : ИнфраИнженерия, 2018. – 384 с. – Текст : непосредственный.
4. ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 2. Требования к электрическим, электронным, программируемым электронным системам, относящимся к безопасности». – Москва : Стандартинформ, 2014. – 80 с. – Текст : непосредственный.
5. Бочков, К. А. Микропроцессорные системы автоматики на железнодорожном транспорте : учебное пособие / К. А. Бочков, А. Н. Коврига, С. Н. Харлап. – Гомель : Белорусский государственный университет транспорта, 2013. – 254 с. – Текст : непосредственный.
6. Казимов, Г. А. Микропроцессорная система централизации стрелок и сигналов EBLOCK 950. / Г. А. Казимов – Москва : Трансиздат, 2008. – 368 с. – Текст : непосредственный.
7. ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования». – Москва : Стандартинформ, 2014. – 51 с. – Текст : непосредственный.

8. Бочков, К. А. Разработка отказоустойчивых систем на основе диверситетных аксиоматических базисов / К. А. Бочков, С. Н. Харлап, Б. В. Сивко. – Текст : непосредственный // Автоматика на транспорте. – 2016. – № 1. – Т. 2. – С. 47 – 61.

9. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников [и др.]; под ред. Вл. В. Сапожникова. – Москва : Транспорт, 1995. – 272 с. – Текст : непосредственный.

10. ГОСТ Р МЭК 62279-2016 «Железные дороги. Системы связи, сигнализации и обработки данных. Программное обеспечение систем управления и защиты на железных дорогах». – Москва : Стандартинформ, 2017. – 94 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Funkcional'naja bezopasnost' sistem jelektricheskikh, jelektronnyh, programmiruemyh jelektronnyh, svjazannyh s bezopasnost'ju. Chast' 4. Terminy i opredelenija, GOST R MJEK 61508-4-2012* (Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Part 4: Definitions and abbreviations, National Standart 61508-4-2012). Moscow, Standardinform, 2014, 28 p.

2. Lipaev V. V. *Funkcional'naja bezopasnost' programmyh sredstv* (Functional safety of software). Moscow, SINTEG, 2004, 348 p.

3. Skljар V. V. *Obespechenie bezopasnosti ASU TP v sootvetstvii s sovremennymi standartami* (Ensuring the safety of the process control system in accordance with modern standards). Moscow, InfraInzhenerija Publ., 2018, 384 p.

4. *Funkcional'naja bezopasnost' sistem jelektricheskikh, jelektronnyh, programmiruemyh jelektronnyh, svjazannyh s bezopasnost'ju. Chast' 2. Trebovanija k jelektricheskim, jelektronnym, programmiruемым jelektronnym sistemam, odnosjashhimsja k bezopasnosti, GOST R MJEK 61508-2-2012* (Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Part 2: Requirements for electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems, National Standart 61508-4-2012), Moscow, Standardinform, 2014, 80 p.

5. Bochkov K. A., Kovriga A. N., Kharlap S. N. *Mikroprocessornye sistemy avtomatiki na zheleznodorozhnom transporte* (Microprocessor railroad automation systems). Gomel': Belarusian State University of Transport Publ., 2013, 254 p.

6. Kazimov G. A. *Mikroprocessornaja sistema centralizacii strelok i signalov EBILOCK 950* (Interlocking Computer EBILOCK 950). Moscow: Transizdat Publ., 2008, 368 p.

7. *Funkcional'naja bezopasnost' sistem jelektricheskikh, jelektronnyh, programmiruemyh jelektronnyh, svjazannyh s bezopasnost'ju. Chast' 1. Obshhie trebovanija, GOST R MJEK 61508-1-2012* (Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Part 1: General requirements, National Standart 61508-4-2012), Moscow, Standardinform, 2014, 51 p.

8. Bochkov K. A., Kharlap S. N., Sivko B. V. Development of fault-tolerant systems based on diversified axiomatic bases [Razrabotka otkazoustojchivyh sistem na osnove diversitetnyh aksiomatcheskikh bazisov]. *Avtomatika na transporte – Automation on Transport*, 2016, no. 1, vol. 2, pp. 47 – 61.

9. Sapozhnikov V. V. and others. *Metody postroenija bezopasnyh mikroelektronnyh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki* (Methods for constructing safe microelectronic systems of railway automation); pod red. Vl. V. Sapozhnikova. Moscow: Transport Publ., 1995, 272 p.

10. *Zheleznnye dorogi. Sistemy svjazi, signalizacii i obrabotki dannyh. Programmnoe obespechenie sistem upravlenija i zashhity na zheleznyh dorogah, GOST R MJEK 62279-2016* (Railway applications. Communication, signalling and processing systems. Software for railway control and protection systems, National Standart 62279-2016), Moscow, Standardinform, 2017, 94 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Харлап Сергей Николаевич

Белорусский государственный университет
транспорта (БелГУТ).

Кирова ул., д. 34, г. Гомель, 246653, Республика
Беларусь.

Кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Информационно-управляющие системы
и технологии», БелГУТ.

Тел.: +375 29 350-89-16.

E-mail: hsn2013@tut.by

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kharlap Sergei Nikolaevich

Belarusian State University Of Transport (BSUT).

34, Kirova st., Gomel, 246653, the Republic of
Belarus.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor, head of
the Department of Information and Control Systems and
Technologies, BSUT.

Phone: +375 29 350-89-16.

E-mail: hsn2013@tut.by

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Харлап, С. Н. Применение диверситета в автоматизированных системах управления опасными технологическими процессами для повышения устойчивости к систематическим отказам / С. Н. Харлап. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 148 – 157.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kharlap S. N. Application of diversity in automated control systems of hazardous technological processes to increase resistance to systematic failures. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 2 (42), pp. 148 – 157 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования;
- электрические станции и электроэнергетические системы;
- энергетические системы и комплексы;
- автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru

Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляется:

рукопись статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (более 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.0.100-2018;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления статьи считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 3 (43) 2020

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 03 июня 2009 г., свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.
Компьютерная верстка – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 25.12.2020.
Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 25.12.2020.

